



Examensarbete  
Civilingenjörsprogrammet i energisystem

# Energianalys av Svensk Växtkrafts biogasanläggning i Västerås

*Energy analysis of Svensk Växtkraft's biogas  
plant in Västerås*

Jenny Liljestam Cerruto



SLU, Sveriges lantbruksuniversitet  
Fakulteten för naturresurser och lantbruksvetenskap  
Institutionen för energi och teknik

Jenny Liljestam Cerruto

Energianalys av Svensk Växtkrafts biogasanläggning i Västerås  
Energy analysis of Svensk Växtkraft's biogas plant in Västerås

Handledare: Ola Norrman Eriksson, Högskolan i Gävle  
Ämnesgranskare: Bengt Carlsson, institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet  
Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU  
EX0269, Examensarbete 30 hp, Avancerad E, teknik  
Civilingenjörsprogrammet i energisystem 270 hp

Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)  
ISSN 1654-9392  
2011:10

Uppsala 2011

Nyckelord: biogas, energieffektivisering, energikartläggning, hygienisering,  
lågtemperaturhygienisering, gasomrörning, värmeförluster

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>



# Abstract

Svensk Växtkraft is the owner of the biogas plant in Västerås. The company is planning to increase their treatment capacity at their biogas plant. In connection to this work it is also possible to make some energy saving changes to the biogas plant. The objective of this study was therefore to make an electricity and heat survey of the biogas plant, a detailed study of the heat consumption in the sanitation step and also a comparison of energy consumption with the present sanitation method and an alternative strategy where the waste is treated in 55 °C during 10 hours (the current method is heating to 70 °C during 1 hour).

The energy survey was conducted in close collaboration with staff at the biogas plant. The current during normal operation was measured, power was calculated and multiplied by the time of usage to obtain the energy consumed. This was performed for each of the larger energy consuming components on the plant. To make the energy comparison of sanitation methods a model of the sanitation step was built. The model describes the largest sources of heat loss in the current sanitation step and estimates how they would change if the sanitation method changes.

During one day of normal operation conditions the biogas plant in Västerås consume 64 kWh electricity per ton feedstock received and 97 kWh heat per ton feedstock received. The largest energy consuming components are estimated to use about 80 % of the total electricity at the plant. The sanitation step is the only large heat consuming step in the production.

Modeling of the sanitation step and comparison of sanitation methods showed that it was possible to reduce heat consumption by 44 % when changing sanitation method to 55 °C during 10 hours. This result is based on a 90 % heat recovery.



# Populärvetenskaplig sammanfattning

Denna rapport handlar om energianvändningen på Svensk Växtkrafts biogasanläggning i Västerås. Syftet med arbetet har varit att få en tydligare bild av vilka komponenter på anläggningen som förbrukar mycket el och värme. Vidare har syftet varit att undersöka om man kan göra en energibesparing genom att byta hygieniseringsmetod.

Studien har utgått från information om anläggningens utformning och energiförbrukning under normaldrift och normaldygn. Tillsammans med driftpersonal har uppgifter om olika energikrävande komponenters elförbrukning och värmeförbrukning samlats in och sammanställts. Därefter har energianvändningen i hygieniseringssteget detaljstuderats och en modell av hygieniseringssteget byggts upp. Med hjälp av den modellen har slutligen två olika metoder för hygienisering kunnat jämföras med varandra. Dels dagens hygienisering med uppvärmning av substratet till 70 °C i en timme och dels lågtemperaturhygienisering i 55 °C under tio timmar. Dessutom har effekterna av en ökad behandlingskapacitet undersökts. Totalt simulerades fyra scenarier.

Svensk Växtkraft tar idag främst emot organiskt hushållsavfall, fettavskiljarslam och vallgrödor som råvaror för att producera biogas. Råvaran för biogasproduktion brukar kallas substrat. Innan substratet kan matas in i rötkammaren och bli till biogas så måste det förbehandlas. Förbehandlingen består av flera steg där substratet sönderdelas, späds med vatten och en viktig funktion är att sortera bort oönskat material. Innan rötning så hygieniseras substratet i 70 °C under en timme för att förhindra smittspridning. Därefter matas substratet in i rötkammaren och mikroorganismer bryter ned materialet under syrefria förhållanden så att biogas bildas. Efter att biogasen behandlats på olika sätt kan den användas som fordonsbränsle i bilar och bussar. Den biorest som blir kvar efter rötning är rik på växtnäring och återförs därför till jordbruket som biogödsel. Biogasanläggningar genererar en hel del oönskade lukter. Det är därför viktigt att ventilationsluften behandlas så att inte närbelägna bostadsområden drabbas av luktproblem.

När energianvändningen på Svensk Växtkraft studerades visade det sig att den komponent som förbrukade mest el (23 %) var gasomrörningen i rötkammartanken. Även luktreduktion av processventilationen förbrukar mycket el (14 %). Hygieniseringssteget är den enda stora fjärrvärmeförbrukaren i anläggningen. Många viktiga parametrar som är användbara vid en elenergikartläggning mäts inte kontinuerligt på biogasanläggningen i Västerås. Det medförde att flera viktiga uppgifter för att beräkna elförbrukningen bara har mätts vid enstaka tillfällen. För att upptäcka variationer måste parametrar som ström och spänning eller effekt mätas många gånger under en längre tid.

Den största delen av värmen som går förlorad i hygieniseringssteget förloras idag via en kylkrets innan rötkammaren. Det är en ren förlust där en kall vätska sänker temperaturen i substratet och värmen transporteras bort och går förlorad. En ganska stor mängd värme förloras i de oisolerade rör som används under fyllning och tömning av hygieniseringstankarna. Endast en jämförelsevis liten del av värmen förloras genom hygieniseringstankarnas väggar under hygieniseringen. Den största källan till värmeförluster i hygieniseringstankarna har inte kunnat fastställas i detta projekt. En bidragande orsak till detta är att miljön i och omkring hygieniseringstankarna är svår att utföra mätningar i.

Modellen av hygieniseringssteget beskriver främst uppvärmning av substratet, värmeförluster genom hygieniseringstankens väggar, hur stor del av tillförd värme som kan återanvändas och hur mycket som måste kylas bort. Den förlust av värme som sker i rörledningarna och den största förlusten i hygieniseringstankarna har inte inkluderats i modellen. Eftersom kylningen och återvinningen av värme utgör ca 90 % av värmetransporterna i hygieniseringssteget så täcker modellen ändå de viktigaste bitarna. Den är tillräckligt bra för att kunna genomföra en jämförelse av hygieniseringsmetoder.

Resultatet av energijämförelsen av nuvarande hygienisering och lågtemperaturhygienisering visar att det går att minska värmebehovet med drygt 40 % om anläggningen byter till lågtemperaturhygienisering. Det förutsätter att det går att återvinna 90 % av den värme som tillförs. Skulle lågtemperaturhygienisering installeras samtidigt som behandlingskapaciteten per år ökade med 48 % skulle värmebehovet minska med totalt 7 % per år jämfört med dagens förbrukning. Om det inte skulle gå att återvinna någon värme alls efter lågtemperaturhygienisering så förbrukar de båda hygieniseringsmetoderna ungefär lika mycket värme på ett år. Idag förbrukar Svensk Växtkraft ungefär 2200 MWh värme och 63 MWh el per år om man förutsätter att alla dagar på året har normaldrift. Enligt anläggningens egna uppskattningar producerar man motsvarande 17000 MWh biogas. Det innebär att anläggningens elförbrukning motsvarar omkring 19 % av energiinnehållet i producerad biogas och värmeförbrukningen 17 % (energiförbrukningen har räknats om till primärenergi).

Den förväntade energibesparingen vid byte av hygieniseringsmetod påverkas av hur utformningen av hygieniseringssteget anpassas till hygieniseringsmetoden. Hur optimerade dimensioner och prestanda i systemet påverkar den slutliga energiförbrukningen vid lågtemperaturhygienisering ingår inte i resultatet av denna utredning. Utredningen visar dock att det kan gå att spara värmeenergi genom att byta hygieniseringsmetod och det anses därför viktigt att undersöka lågtemperaturhygienisering mer. Några av de slutsatser och rekommendationer som kan göras av energikartläggningen är att det skulle vara intressant att undersöka om gasomrörningen kan bytas ut mot mekanisk omrörning. Genom att isolera rörledningen in till och ut från hygieniseringstankarna kan man antagligen göra en betydande energibesparing i nuvarande process. Det finns alltså anledning att fortsätta undersöka lågtemperaturhygienisering och samtidigt arbeta med energieffektivisering av den befintliga anläggningen.



# Förord

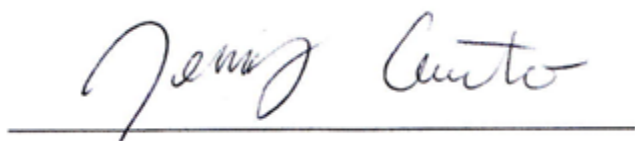
Detta examensarbete utgör den avslutande delen av civilingenjörsprogrammet i energisystem på Uppsala Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet. Examensarbetet genomfördes under perioden januari till juni 2011. Arbetet har utförts i anslutning till Svensk Växtkrafts biogasanläggning i Västerås med handledning av Ola Norrman Eriksson på Gävle Högskola. Ämnesgranskare har varit Bengt Carlsson, Uppsala Universitet. Examinator har varit Åke Nordberg Institutionen för energi och teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet.

Tack till personalen på Svensk Växtkraft som har hjälpt till med datainsamlingen och ett särskilt tack till Alf Tunström men även Niklas Leksell och Carl-Magnus Pettersson.

Jag vill också rikta ett tack till Kjell Pernestål, Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala Universitet för din uppmuntran till oss studenter i vårt sökande efter kunskap.

Avslutningsvis vill jag tacka mina fantastiska kurskamrater på energisystemprogrammet. Utan er hade detta examensarbete aldrig blivit verklighet.

Uppsala i juni 2011

A handwritten signature in dark ink, reading "Jenny Cerruto", is written over a horizontal line.

Jenny Liljestam Cerruto

## **Ordlista**

ABP-förordningen	Förordningen om animaliska biprodukter
Batch	Se sats.
Biogasanläggning	Hela anläggningen från mottagning av substrat tills att rötresten lämnar anläggningen, även rening av gasen kan inkluderas. Oftast exkluderas uppgradering av gasen.
HRT	Hydraulic retention time eller på svenska hydraulisk uppehållstid i rötkammaren.
Hyg.tank	Hygieniseringstank
Lågtemperaturhygienisering	Hygienisering i minst 55 °C under 10 timmar.
Normaldrift	Med normaldrift och normaldygn avses drift utan extrema störningar.
Normaldygn	Normaldygn är ett dygn med normaldrift och inga större avvikelser av drifttid.
RK	Rötkammare d.v.s. den cistern där den anaeroba nedbrytningen sker och biogas bildas.
Rötningsanläggning	Se biogasanläggning.
Sats	I biogassammanhang oftast en laddning av substrat i rötkammaren eller hygieniseringen. Motsatsen till kontinuerlig matning är satsvis matning. Ibland används även ordet "batch" istället för sats.
Substrat	Den råvara som används i biogasproduktionen utan tillsats av vatten. Består ofta av organiskt avfall och restprodukter.
Substratblandning	Substrat efter spädning med vatten.
Svämtäcke	Ansamling av partikulärt material som bildar ett täcke på ytan av substratet i en tank.
TS, Torrsubstanshalt	Viktandelen av substratet som inte är vatten. Anges i procent.

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemformulering .....	2
1.2	Syfte .....	2
1.3	Mål.....	2
1.4	Avgränsningar.....	2
<b>2</b>	<b>Teori .....</b>	<b>3</b>
2.1	Ellära .....	3
2.1.1	Elförbrukning .....	3
2.1.2	Specifik energiförbrukning .....	3
	<i>Termodynamik.....</i>	<i>4</i>
2.1.3	Värmemängdsändring.....	4
2.1.4	Värmeväxling och återvinningsgrad.....	5
2.1.5	Konduktionsförluster .....	6
2.1.6	Värmeövergångskoefficient.....	8
2.1.7	Värmeförlust genom ventilationen.....	9
2.1.8	Värmeförlust i rörledning.....	9
2.2	Modellbygge och modellvalidering .....	11
<b>3</b>	<b>Metod.....</b>	<b>11</b>
3.1	Energikartläggning.....	11
3.1.1	Anläggningsbeskrivning.....	12
3.1.2	Datainsamling och beräkningar .....	14
3.2	Energiinventering av nuvarande hygienisering.....	15
3.2.1	Processbeskrivning.....	15
3.2.2	Datainsamling och beräkningar .....	16
3.3	Energijämförelse av två hygieniseringsmetoder .....	18
3.3.1	Scenarion.....	18
3.3.2	Modell .....	19
3.3.3	Validering av modellen.....	20
3.3.4	Beräkningar .....	21
<b>4</b>	<b>Resultatredovisning .....</b>	<b>22</b>
4.1	Energiflöden på anläggningen .....	22
4.1.1	Elförbrukning .....	22
4.1.2	Värmeförbrukning.....	24
4.1.3	Specifik energiförbrukning .....	24
4.2	Energiflöden i hygieniseringssteget.....	25

4.2.1	Värmeförlust.....	26
4.2.2	Förbrukad värme och el .....	27
4.3	<i>Utvärdering av alternativ hygieniseringsmetod</i> .....	28
4.3.1	Förändrat värmebehov .....	28
4.3.2	Förändrad elförbrukning .....	31
4.3.3	Värmeväxlare och värmeåtervinningsgrad.....	31
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>34</b>
5.1	<i>Andra anläggningars energiförbrukning</i> .....	34
5.2	<i>Värmeförluster och mätfel i hygieniseringssteget</i> .....	35
5.3	<i>Värmeåtervinningsgrad och värmebesparing</i> .....	36
5.4	<i>Val av modell</i> .....	37
5.5	<i>Energipriser</i> .....	37
<b>6</b>	<b>Slutsats och förslag på vidare studier</b> .....	<b>37</b>
6.1	<i>Elförbrukning</i> .....	37
6.2	<i>Värme i hygieniseringssteget</i> .....	38
6.3	<i>Lågtemperaturhygienisering</i> .....	38
6.4	<i>Ökad behandlingskapacitet</i> .....	38
	<b>Referenser</b> .....	<b>39</b>
	<b>Appendix 1</b> .....	<b>41</b>

# 1 Inledning

I Sverige var avloppsreningsverken först med att producera biogas. Det var inte förrän omkring 40 år senare som biogasproduktion i samrötningsanläggningar tog fart (Biogasportalen 2011). De första centrala samrötningsanläggningarna i Sverige är idag cirka 15 år gamla. I avloppsreningsverken rötas slam från vattenreningsprocessen medan samrötningsanläggningarna ofta rötar organiskt hushållsavfall tillsammans med en blandning av andra organiska restprodukter. Biogas består främst av metangas och koldioxid och bildas när organiskt material bryts ned under syrefria förhållanden. Det är metangasen som är energibäraren i biogas.

Motsvarande 20-30 % av den producerade biogasens energiinnehåll krävs ofta som insatts för att driva hela biogassystemet<sup>1</sup> (Berglund & Börjesson, 2003). Det är driften av rötningsanläggningen som generellt står för den största andelen förbrukad energi (Berglund & Börjesson, 2003). Genom att kartlägga energiflöden i anläggningen kan viktiga energibesparingsåtgärder identifieras.

Det finns flera energikrävande steg på en biogasanläggning men beroende på processutformning kan det se lite olika ut hur energiförbrukningen fördelar sig. Förbehandling, hygienisering, uppvärmning av substrat, omrörning och pumpning av substrat kan vara några av de steg i processen som förbrukar mycket energi. Man skiljer på rötning i reningsverk och rötning i samrötningsanläggning. Under ett examensarbete om energianvändningen på Duvbackens reningsverk identifierades cirkulationspumpar, omrörare och slampumpar som energikrävande komponenter i rötkammardriften (Mossberg 2007). I en liknande utredning på Käppalaverket nämner man dessutom ventilationsfläktar men pekar framförallt ut värmepumpar (för uppvärmning av substratet i rötkammaren) som energikrävande delar (Magnusson 2006). Rötning på reningsverk och samrötningsanläggningar skiljer sig åt i flera avseenden men har några grundläggande likheter. De har liknande behov av uppvärmning och omrörning i rötkammaren samt krav på någon form av avsättning för sin rötslam/bioslam. Däremot saknar ofta reningsverk de energikrävande förbehandlingssteg som samrötningsanläggningar i stor utsträckning har. Substratet in till produktionen skiljer sig åt i många avseenden.

Eftersom samrötningsanläggningar ofta rötar animaliska avfallsprodukter så finns det särskilda krav på hygienisering. Dessa krav styrs av den så kallade ABP-förordningen (1774/2002) som är förordningen om animaliska biprodukter (Carlsson och Uldal 2009). Man delar in avfallet i tre säkerhetsklasser där olika krav på hygienisering gäller för varje kategori. Matavfall från restauranger, storkök och kök är än så länge undantaget från hygieniseringskraven i ABP-förordningen. Det finns istället rekommendationer om hur avfallet bör hanteras. Det arbete som nu pågår med att förändra hygieniseringskraven har bidragit till intresset att undersöka alternativa hygieniseringsmetoder (Norin 2007). Den vanligaste metoden idag som även brukar användas för matavfall är hygienisering i 70 °C i 1h. Med nya regler kan det finnas möjligheter att använda andra, energieffektiva hygieniseringsmetoder.

Energiarbete på biogasanläggningar är fortfarande nytt. Biogasproduktion i samrötningsanläggningar har bedrivits under relativt kort tid om man jämför med rötning i reningsverk. Inledningsvis var starten och arbete med att få en fungerande kontinuerlig process det största arbetet för samrötningsanläggningarna. Idag finns flera fungerande anläggningar som istället har möjlighet att arbeta med optimering av biogasprocessen. Det öppnar upp för arbetet med att energieffektivisera produktionen. Samtidigt är rötning en känslig process och alla förslag till förändringar måste vägas mot inverkan på processtabilitet och gasproduktion.

Att arbeta för en energieffektivare process ligger i biogasproducenternas eget intresse då det kan innebära avsevärda kostnadsminskningar. En minskad energiförbrukning är på så sätt också en

---

<sup>1</sup> För definition av biogassystem se rapporten *Energianalys av biogassystem* (2003).

möjlighet att stärka biogasens konkurrenskraft gentemot andra energislag. På Svensk Växtkrafts anläggning i Västerås är det dessutom extra intressant att studera värmeförbrukningen eftersom uppvärmningen sker med fjärrvärme som produceras vid förbränning av deponigas från intilliggande deponi. Lägre värmebehov innebär ökade möjligheter att utnyttja deponigasen till fordonsgas och att på så vis öka produktionen av ett förnyelsebart fordonsbränsle.

## 1.1 Problemformulering

Svensk Växtkraft planerar en del förändringar av sin biogasproduktion vilket antagligen kommer leda till en del ombyggnationer av anläggningen. Bland annat planeras det för att eventuellt öka behandlingskapaciteten. Därför är man intresserad av att göra en energikartläggning av processen för att upptäcka möjliga energibesparingsåtgärder innan ombyggnationen. Man vill särskilt undersöka om det kan finnas energivinster i att byta hygieniseringsmetod till lågtemperaturhygienisering.

Arbetet kommer att delas in i två delar. Dels en energikartläggning av hela anläggningen och dels en specifik energijämförelse av nuvarande och alternativ hygieniseringsmetod.

## 1.2 Syfte

Syfte är att få en bättre överblick av energianvändningen på Svensk växtkrafts biogasanläggning. Att kvantifiera el- och värmeförbrukning och undersöka hur energiförbrukningen fördelar sig på olika delar av processen. Vidare är syftet att studera hur specifika förändringar av processen så som ökad behandlingskapacitet och ändrad hygienisering, påverkar energiförbrukningen.

## 1.3 Mål

Det övergripande syftet har delats in i nedanstående konkreta mål som skall uppnås under examensarbetet.

Göra en energikartläggning av Svensk Växtkrafts biogasanläggning. Energikartläggningen skall innehålla information om elförbrukning, värmeförbrukning och fördelning av energiförbrukning på olika steg i processen.

Kartlägga värmeflöden i nuvarande hygieniseringssteg.

Bygga upp en beräkningsmodell som kan användas för att jämföra energiförbrukningen för aktuell hygieniseringsmetod och lågtemperaturhygienisering, samt för aktuell och ökad behandlingskapacitet.

Undersöka hur värmeväxlingen påverkas av ändrad hygieniseringsmetod.

Uppskatta det ekonomiska värdet av energiförbrukningen och förändringar av energiförbrukningen på anläggningen.

## 1.4 Avgränsningar

Energikartläggningen avgränsar sig till processerna som rör biogasproduktionen och som finns på Svensk Växtkrafts anläggning. Behandling av biogas som rening och uppgradering inkluderas inte. Framförallt undersöks elenergi och värme medan bränsleförbrukning till eventuella maskiner inte inkluderas. Arbetet avgränsar sig också till att främst sammanställa redan befintlig data och bara i begränsad utsträckning utföra mätningar. Ingen hänsyn kommer att tas till årstidsvariationer av energiförbrukning.

Energijämförelsen begränsas till att jämföra hygieniseringssteget med aktuell processprestanda. Det betyder att ändrad hygieniseringsmetod eller behandlingskapacitet inte medför någon ändring av dimensioner på tankar, omrörare, pumpar och värmeväxlare. En ökad behandlingskapacitet innebär istället att exempelvis fler tankar med samma prestanda byggs.

## 2 Teori

Energikartläggningen och energijämförelsen grundar sig på en rad teoretiska, fysikaliska och termodynamiska samband. I detta kapitel redovisas dessa samband utan att närmare gå in på hur de har använts. Under kapitel 3 Metod förklaras istället hur och var dessa samband använts.

### 2.1 Ellära

#### 2.1.1 Elförbrukning

Enligt teori för växelström och trefasnät kan effekten (P) beräknas som nedan (Nordling & Österman 2006) förutsatt att huvudspänning, fasström och effektfaktor kan fastställas. Utifrån beräknad effekt och känd tid kan energiförbrukningen under en viss tid bestäms enligt sambandet (effekten antas vara konstant över tiden).

$$E = P * t = (\sqrt{3} * U_h * I_f * \cos \varphi) * t \quad (1)$$

där

E = elenergi [J] eller [Wh]

P = effekt över trefas [W]

t = tid [s] eller [h]

$I_f$  = fasström [A]

$U_h$  = huvudspänning [V]

$\cos(\phi)$  = effektfaktor

#### 2.1.2 Specifik energiförbrukning

Ett mått som möjliggör jämförelse av energiförbrukning mellan olika biogasanläggningar är energiförbrukning per massenhet eller specifik energiförbrukning. Samma beräkningsgång kan göras för specifik el- respektive värmeförbrukning. Massan är antingen massan av obehandlat substrat det vill säga före dispergering eller massan av substratblandning det vill säga substrat efter dispergering. Den specifika energiförbrukningen ges av

$$e = \frac{E}{m} \quad (2)$$

där

e = specifik energiförbrukning [J/kg] eller [kWh/kg]

E = energi i [J] eller [kWh]

m = massa i [kg]

Ett annat mått som kan användas för jämförelse mellan olika anläggningars energiförbrukning är energiförbrukning som andel av producerad energi (i detta fall biogas) vilket kan beräknas enligt:

$$E_{\%} = \frac{E_{biogas}}{E_{drift}} \quad (3)$$

där

$E_{\%}$  = förbrukad energi som andel av energi i producerad biogas.

$E_{biogas}$  = energiinnehåll i producerad biogas [kWh].

$E_{drift}$  = energiförbrukning för drift av anläggningen [kWh].

I vissa fall anges energin som primärenergi. Primärenergi inkluderar även den energimängd som gått åt för att producera en användbar energienhet av till exempel el eller värme. I praktiken multipliceras energiförbrukningen med en primärenergifaktor. En energienhet el är ofta betydligt mer energikrävande att producera än värme vilket ibland kan vara viktigt att belysa genom att ange el- eller värmeförbrukning som primärenergi.

Den vanligaste enheten för energi som används av elbolag och elkonsumenter är watt timmar "Wh". I beräkningar och formler så används ofta enheten joule "J".

## Termodynamik

### 2.1.3 Värmemängdsändring

När värme transporteras från ett system till ett annat förändras systemens värmemängd, det är fråga om en värmemängdsändring hos systemen. Det är först då när ett system avger eller upptar värme, som det är termodynamisk intressant att studera värmemängd (Alvarez, 2006).

Att beräkna värmemängdsändringen kan vara ett relativt enkelt sätt att bestämma hur stor värmemängd som upptagits eller avgivits av ett system. Det förutsätter att systemets massa, specifik värmekapacitet och temperaturändring kan beräknas (Alvarez 2006, 263). Förutsatt att dessa parametrar är kända så kan värmemängdsändring beräknas enligt

$$Q_{vrm} = \rho V c (T_2 - T_1) \quad (4)$$

där

$Q_{vrm}$  = värmemängdsändring [J]

$\rho$  = densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  = volym [m<sup>3</sup>]

$c$  = specifik värmekapacitet [J/kgK]

$T_2$  = temperatur sluttillstånd [K]

$T_1$  = temperatur initialt tillstånd [K]

Ett ämnes specifika värmekapacitet betecknas "c" och anger vilken värmemängd som måste tillföras en massenhet av ämnet för att höja dess temperatur med en grad. Specifik värmekapacitet är beroende av temperaturen men i praktisk tillämpning (som här) är det ofta tillräckligt att räkna med ett medelvärde (Alvarez 2006).



Med utgångspunkt från substratets torrsubstanshalt kan dess specifika värmekapacitet enligt (Svahn 2006, 13) beräknas som

$$c = \frac{(100 - TS) * 4180 + TS * 1050}{100} \quad (5)$$

där

c = specifik värmekapacitet för substrat [J/kgK]

TS = torrsubstanshalt [%]

## 2.1.4 Värmeväxling och återvinningsgrad

En värmeväxlares funktion är att överföra värme från ett medium till ett annat. Det finns flera olika sorters värmeväxlare men här avses tubvärmeväxlare. Tekniken är utformad så att varmt slam värmeväxlas mot ett arbetsmedium (här vatten) som sedan överför värmen via värmeväxlare till det kalla slammet. Mellan arbetsmediet och slammet finns en skiljevägg. Det är viktigt att värmegenomgångskoefficienten för den skiljeväggen är så hög som möjligt för att värmen lätt ska kunna överföras genom väggen (Alvarez 2006, 406).

Värmeväxling med slam i en biogasanläggning medför av erfarenhet, förhöjd risk för igensättningar och beläggningar i värmeväxlare (Andersson 2011, 56-57), (Jonsson, pers. medd. 2011). Detta minskar värmeväxlarens förmåga att överföra värme effektivt mellan varmt och kallt medium. Ibland orsakar kraftiga igensättningar att värmeöverföring i värmeväxlare förhindras helt. En värmeväxlares förmåga att överföra värme från det varma mediet till det kalla kan beskrivas som värmeväxlarens verkningsgrad och beräknas enligt.

$$\eta_{vwx} = \frac{P_k}{P_v} = \frac{\rho_k \dot{V}_k c_k (T_{k2} - T_{k1})}{\rho_v \dot{V}_v c_v (T_{v2} - T_{v1})} \quad (6)$$

där

$\eta_{vwx}$  = värmeväxlares verkningsgrad[%]

P = upptagen respektive avgiven värmeeffekt på kall respektive varm sida [W]

$\rho$  = densitet [kg/m<sup>3</sup>]

V = volym [m<sup>3</sup>/s]

c = specifik värmekapacitet [J/kgK]

T<sub>2</sub> = temperatur ut från värmeväxlare [K]

T<sub>1</sub> = temperatur in till värmeväxlare [K]

Index k = kallt flöde, index v = varmt flöde.

Värmeväxlare kan utnyttjas för att återvinna tillförd värme och behålla det i systemet. Värme tillförs systemet i uppvärmningssteget och återförs via värmeåtervinningskrets i förvärmningssteget.

Värmeåtervinningsgraden är ett mått på hur mycket av den värme som tillförs systemet som sedan återförs via värmeåtervinning tillbaka till systemet. Återvinningsgraden kan i praktiken aldrig vara 100 % eftersom det i verkligheten alltid finns värmeförluster i ett system.

Värmeåtervinningsgrad (ibland kort återvinningsgrad) inkluderar värmeväxlarens verkningsgrad indirekt. Här jämförs tillförd värme i uppvärmningssteget  $E_{till}$  med tillförd återvunnen värme  $E_{åter}$  i förvärmningssteget (då har det redan passerat värmeväxlingen) enligt

$$\eta_{V\ddot{A}} = \frac{E_{åter}}{E_{till}} = \frac{\rho V c (T_{1b} - T_1)}{\rho V c (T_3 - T_{1b})} \quad (7)$$

där

$E_{åter}$  = återvunnen värme [J]

$E_{till}$  = tillförd värme i värmekretsen [J]

$\rho$  = densitet för fluiden [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V$  = volymflöde [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$T_{1b}$  = temperatur ut från förvärmningen [K]

$T_1$  = temperatur in till förvärmningen [K]

$T_3$  = temperatur efter uppvärmningssteget [K]

### 2.1.5 Konduktionsförluster

Värmetransport sker när temperaturen är varmare på ett ställe och kallare på ett annat. Ett vanligt exempel är att temperaturen är högre på insidan av en isolerad vägg och lägre på dess utsida varvid värmetransport sker genom väggen. Värmetransport som sker på detta sätt kallas konduktion eller värmeledning. När temperaturen och värmeflödet genom väggen inte förändras över tiden brukar förloppet beteckna som stationär konduktion (Çengel 2006, 63). Kan det dessutom förutsättas att ingen temperaturgradient finns längst med väggen så behöver bara flödet i väggens normalriktning studeras. Stationär konduktion i en dimension kan enligt (Çengel 2006, 18) generellt beräknas som

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cd}} \quad (8)$$

där

$\dot{Q}_{cond}$  = ledningsförluster [W]

$k$  = värmeledningsförmåga hos materialet [ $\text{W}/\text{mK}$ ]

$A$  = aktuella ytans area [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta x$  = tjockleken på aktuellt material [m]

$T_2$  = temperaturen på utsidan av aktuellt material [K].

$T_1$  = temperaturen på insidan av aktuellt material [K] eller.

$R$  = termisk resistans [ $\text{K}/\text{W}$ ].

Konduktion påverkas av flera parametrar. Typ av väggmaterial, tjocklek och temperaturdifferens över väggen är några saker som påverkar. Konduktion beror också på väggens geometriska form. För en cylindrisk vägg som består av tre olika materiallager beräknas konduktion genom väggen enligt (Çengel 2006, 152) som

$$\dot{Q}_{wall} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{wall}} \quad (9)$$

$$R_{wall} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi H k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi H k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi H k_1} \quad (10)$$

där

$\dot{Q}_{wall}$  = värmeförluster genom cylinderformad vägg [W]

$T_2$  = temperaturen på utsidan av aktuellt material [K].

$T_1$  = temperaturen på insidan av aktuellt material [K].

R = termisk resistans [K/W].

$r_1$  = innerradie cylinderformad vägg [m]

$r_2$  = radien inklusive första materiallagret [m]

$r_3$  = radien inklusive andra materiallagret [m]

$r_4$  = radien inklusive tredje materiallagret [m]

H = väggens höjd [m]

k = värmeledningsförmåga hos respektive material i väggen [W/mK]

En vägg som har välvd form likt en del av en sfär, har en annan termisk resistans. Konduktion genom en välvd vägg med tre olika materiallager beräknas enligt (Çengel 2006, 152) och (Nordling & Östman 2006, 408) som

$$\dot{Q}_{bot} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{bot}} \quad (11)$$

$$R_{bot} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi h_1 k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi h_2 k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi h_3 k_3} \quad (12)$$

där

$\dot{Q}_{bot}$  = värmeförluster genom välvd vägg [W]

$T_2$  = temperaturen på utsidan av aktuellt material [K].

$T_1$  = temperaturen på insidan av aktuellt material [K] eller.

R = termisk resistans [K/W].

$r_1$  = innerradien på välvd vägg [m]

$r_2$  = radien inklusive första materiallagret [m]

$r_3$  = radien inklusive andra materiallagret [m]

$r_4$  = radien inklusive tredje materiallagret [m]

h = höjden på del av sfären räknat från basen [m]

k = värmeledningsförmåga hos materialet i väggen index 1 och 3=plast, 2=isolering. [W/mK]

Konduktion genom en plan cirkulär vägg med tre olika materiallager kan enligt (Çengel 2006, 18) beräknas enligt

$$\dot{Q}_{top} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{top}} \quad (13)$$

$$R_{top} = \frac{\Delta x_1}{k_1 * \pi r^2} + \frac{\Delta x_2}{k_2 * \pi r^2} + \frac{\Delta x_3}{k_3 * \pi r^2} \quad (14)$$

där

$\dot{Q}_{top}$  = värmeförlust genom plan cirkulär vägg.

$T_2$  = temperaturen på utsidan av aktuellt material [K].

$T_1$  = temperaturen på insidan av aktuellt material [K] eller.

$R$  = termisk resistans [K/W].

$\Delta x$  = tjockleken på respektive material [m]

$k$  = värmeledningsförmåga hos respektive material [W/mK]

$r$  = den cirkulära väggens radie [m]

### 2.1.6 Värmeövergångskoefficient

Den värmemängd som transporteras genom en vägg kan beräknas med formler för konduktion enligt föregående kapitel. Detta förutsätter att temperaturerna på väggens båda ytor är kända. Om temperaturen på väggens båda ytor och temperaturen i rummet går att mäta samt värmemängden som transporteras genom väggen är känd så är det enligt (Alvarez 2006, 400) möjligt att beräkna värmeövergångskoefficienten för detta fall enligt

$$h = \frac{\dot{Q}_{cond}}{A(T_{K1} - T_{K\infty})} \quad (15)$$

där

$h$  = värmeövergångskoefficient [W/m<sup>2</sup>K]

$\dot{Q}_{cond}$  = konduktion genom vägg [W]

$A$  = väggens area vinkelrätt mot värmeflödet [m<sup>2</sup>]

$T_{K1}$  = temperaturen på väggens kalla yta [K]

$T_{K\infty}$  = temperaturen i rummet på den kalla sidan [K]

Om istället värmetransporten från kall till varm sida av väggen eftersöks när endast temperaturen i rummet på respektive sida är känd kan värmeövergångskoefficienten utnyttjas tillsammans med termiska resistansen. Värmetransport från varm till kall sida av väggen när värmeövergångskoefficienten är känd beräknas då istället enligt följande (Çengel 2006).

$$Q = \frac{(T_V - T_K)}{R_{cd} + \frac{1}{hA}} \quad (16)$$

där

$Q$  = transporterad värmemängd genom väggen [W]

$T_V$  = temperaturen i rummet på den varma sidan [K]

$T_K$  = temperaturen i rummet på den kalla sidan [K]

$R_{cd}$  = total termisk resistans för aktuell vägg [K/W]

$h$  = värmeövergångskoefficient för rådande förhållanden [W/m<sup>2</sup>K]

$A$  = väggens area vinkelrätt mot värmeflödet [m<sup>2</sup>]

### 2.1.7 Värmeförlust genom ventilationen

Under varma processer likt hygienisering som sker vid 70 °C kan ånga under vissa förhållanden bildas. För att ta reda på hur mycket av den ånga som bildas som sedan transporteras ut via ventilation under hygieniseringen kan ett Prantls rör och hygrometer användas. Prantls rör mäter tryckdifferensen mellan stagnationstrycket och det statiska trycket, alltså det dynamiska trycket. Dynamiskt tryck och densiteten behövs för att sedan kunna lösa ut hastigheten ur Bernoullies ekvation (Ekroth & Granryd 1994, 304). Med hjälp av den informationen om hastigheten och rörets tvärsnittsarea kan flödet i ventilationstrumman slutligen beräknas med

$$\phi = \sqrt{\frac{2 * (p_0 - p_1)}{\rho}} * A \quad (17)$$

där

$\phi$  = flödeshastighet [m<sup>3</sup>/s]

$p_0$  = stagnationstryck [Pa]

$p_1$  = statiska tryck [Pa]

$\rho$  = densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  = rörets tvärsnittsarea [m<sup>2</sup>]

För att beräkna hur mycket energi som förloras genom att ånga ventileras bort behövs information om ångbildningsvärmes. Ångbildningsvärme är den värmeenergi som går åt när en viss mängd av ett ämne (här vatten) förångas under konstant temperatur vid ett bestämt tryck. Det är ett tabellvärde som går att avläsa om man vet temperaturen vid kokpunkten eller trycket. Med en hygrometer kan man sedan mäta fukthalten. Fukthalten multipliceras med flödet från formel 17 för att beräkna mängden ånga som ventileras bort. Förlorad värmeenergi beräknas slutligen genom att mängden ånga multipliceras med ångbildningsvärmes.

### 2.1.8 Värmeförlust i rörledning

När en fluidström i ett rör har högre temperatur än omgivningen uppstår värmetransport (konvektion) till omgivningen. Att beräkna värmekonvektionen i ett rör med en strömmande fluid kan vara komplicerat. Det går att förenkla problemet genom att se fluidpaketet som ett isolerat system. När det rör sig genom rörledningen förändras dess värmemängd och man kan istället utnyttja formel 4 för värmemängdsändring mellan två tillstånd.

I vissa fall går temperaturen i olika punkter eller vid olika tillstånd att mäta men ibland måste temperaturen istället beräknas utifrån andra kända temperaturer för att värmemängdsändringen ska

kunna fastställas. Nedan följer en beskrivning av hur en okänd temperatur i ett substrat i rörmyningen in till en tank kan beräknas, utifrån känd temperatur i början av röret och känd temperatur inne i tanken.

En isolerad tank skall fyllas med uppvärmt substrat via en rörledning in till tanken. Temperaturen mäts i början av röret och inne i tanken. Alldeles innan substratet kommer in i tanken har det en viss okänd temperatur och ett visst känt volymflöde. När en viss volym kommer in i tanken och blandar sig med redan ansamlad substrat i tanken får blandningen en ny gemensam temperatur som kan antas vara jämt fördelad i blandningen. Den värmemängd som på detta sätt tillförs tanken kan beräknas som värmemängdsändringen för den tillförda substratvolymen. Eftersom tillfört substrat har en högre temperatur så kommer värme att avgas. Avgiven värme från den tillförda substratvolymen beräknas enligt

$$Q_{till} = \rho V_{till} c (T_{tank} (n + 1) - T_{till} (n)) \quad (18)$$

där

$Q_{till}$  = värmemängdsändring hos fluid [J]

$\rho$  = densitet hos fluid [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V_{till}$  = tillförd fluidvolym vid tiden (n) [ $\text{m}^3$ ]

$c$  = specifik värmekapacitet för fluid [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

$T_{tank}$  = temperatur vid tiden (n+1) inne i tanken [K]

$T_{till}$  = den sökta fluidtemperaturen vid tiden (n) i röret alldeles innan tanken [K]

I formel 18 är förutom den sökta temperaturen  $T_{till}$ , även värmemängdsändringen  $Q_{till}$  okänd. Den måste beräknas utifrån andra kända variabler. Avgiven värme från det tillförda substratet är till beloppet lika stor som värmemängdsändringen av substratvolymen som ackumulerats i tanken. Förluster till omgivningen försummas. Värmemängdsändringen i ackumulerad substratvolym efter tillsats av varmt substrat beräknas enligt.

$$Q_{tank} = \rho V(n)_{tank} c (T_{tank} (n + 1) - T_{tank} (n)) \quad (19)$$

$Q_{tank}$  = värmemängdsändring i tanken [J]

$\rho$  = densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V_{tank}$  = den ackumulerade fluidvolymen i tanken vid tiden (n) [ $\text{m}^3$ ]

$c$  = specifik värmekapacitet för fluid [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

$T_{tank}$  = temperatur vid tiden (n+1) och (n) inne i tanken [K]

Genom att försumma förlusterna till omgivningen under fyllningen av tanken kan man sätta formel 18 lika med formel 19 och lösa ut den sökta temperaturen. Observera att formel 18 måste ha omvänt tecken. Följande uttryck kan då ställas upp för att beräkna temperaturen  $T_{till}$  hos substratet alldeles innan hygieniseringstanken.

$$T_{till} (n) = T_{tank} (n + 1) + \frac{V(n)_{tank} (T_{tank} (n + 1) - T_{tank} (n))}{V_{till}} \quad (20)$$

Teckenförklaring enligt tidigare angivelser.

## 2.2 Modellbygge och modellvalidering

En stor del av detta arbete kommer att omfatta uppbyggnaden av en modell av en hygieniseringsprocess. För att bygga en bra modell så krävs ofta en stor förståelse för det system man studerar men också möjlighet att testa hur bra modellen är på att besvara den frågeställning som ställts upp. Kan inte en modell valideras är den i praktiken oanvändbar. Eller som det uttrycks nedan.

”En modell är användbar först då dess giltighet har testats och fastställts.” (Glad & Ljung 2004, 389)

Att en modell är användbar eller giltig är inte detsamma som att den exakt beskriver verkligheten. Det betyder snarare att den är funktionell och till nytta för att lösa ett visst problem (Glad & Ljung 2004). Den tjänar sitt syfte. Ett genomgående drag för modellvalidering är att utsignal från modellen och systemet när de matats med samma insignal jämförs (Glad och Ljung 2004, 390). Skillnaden skall vara liten.

Om det i en hygieniseringstank går att mäta de totala förlusterna under ett bestämt tidsintervall så kan denna information utnyttja för att testa modellens giltighet. I den aktuella modellen är det möjligt att beräkna konduktiva värmeförluster och förluster via ventilation (ångbildning). Då kan summan av dessa förluster (utsignal från modellen) jämföras med totala uppmätta förluster i tanken (utsignal från systemet) under ett bestämt tidsintervall. Förutsatt att inga andra förluster finns bör skillnaden vara liten. Beräkningsmodellen kan på så sätt valideras. Modellen är valid om följande villkor kan uppfyllas.

$$Q_{cond} + Q_{vent} = Q_{hy} \quad (21)$$

där

$Q_{hy}$  = totala uppmätta värmeförluster i hygieniseringstanken under en viss tid [J]

$Q_{vent}$  = beräknade värmeförluster genom ventilation under en viss tid [J]

$Q_{cond}$  = beräknade ledningsförluster genom tankens isolering under en viss tid [J]

## 3 Metod

I detta kapitel redovisas hur teori har använts för att utföra beräkningar och få fram resultat. Det är också här som detaljerade avgränsningar redovisas. I inledningen av varje stycke presenteras den övergripande metoden för att uppnå de utsatta målen därefter följer en beskrivning av det system som studerats och i slutet beskrivs hur beräkningarna har genomförts.

### 3.1 Energikartläggning

Få rapporter med energiutredningar av samrötningsanläggningar har publicerats i Sverige. Särskilt om man jämför med biogasproduktion i reningsverk där det görs en hel del arbete för att energieffektivisera (Svenskt Vatten 2011), (Magnusson 2006), (Mossberg 2007). Det finns ännu ingen självklar standard hur biogasanläggningen ska energikartläggas. Däremot finns det generell kunskap om energieffektivisering som tillsammans med erfarenheter från reningsverkens energiarbete kan användas som grund vid energikartläggning av biogasprocessen. I detta examensarbete har erfarenheter från en nyligen genomförd energikartläggning av Uppsalas biogasanläggning varit till stor nytta (Andersson 2011).

Energimyndigheten har publicerat ett material som generellt beskriver arbetet med energieffektivisering av små och medelstora företag (Energimyndigheten 2011). Metoden för att

energikartlägga Svensk Växtkrafts anläggning har utifrån energimyndighetens rekommendationer och erfarenheter i ovan nämnda arbeten delats in i följande steg.

1. Kartläggning av processutformningen och fastställande av processschema aktuell process.
2. Datainsamling av energiförbrukning på anläggningen.
3. Mätningar av okända energiflöden.
4. Sammanställning av resultat och slutsatser.
5. Förslag på åtgärder.

I detta projekt har kartläggningen anpassats efter tillgången på data och begränsats av tiden för att utföra mätningar. Kartläggningen tar inte hänsyn till några variationer under året eller mellan dagar utan utgår från en normaldag med normaldrift. Med normaldrift och normaldygn avses drift utan extrema störningar. Normaldygn är ett dygn med normaldrift och inga större avvikelser av drifttid. I en heltäckande energikartläggning bör mätningar av energiförbrukningen göras under en längre tid av året eftersom årstidsvariationerna kan vara betydande. Tonvikten har istället lagts på att uppskatta elenergiförbrukningen och jämföra resultatet med uppmätt elförbrukning under ett normaldygn.

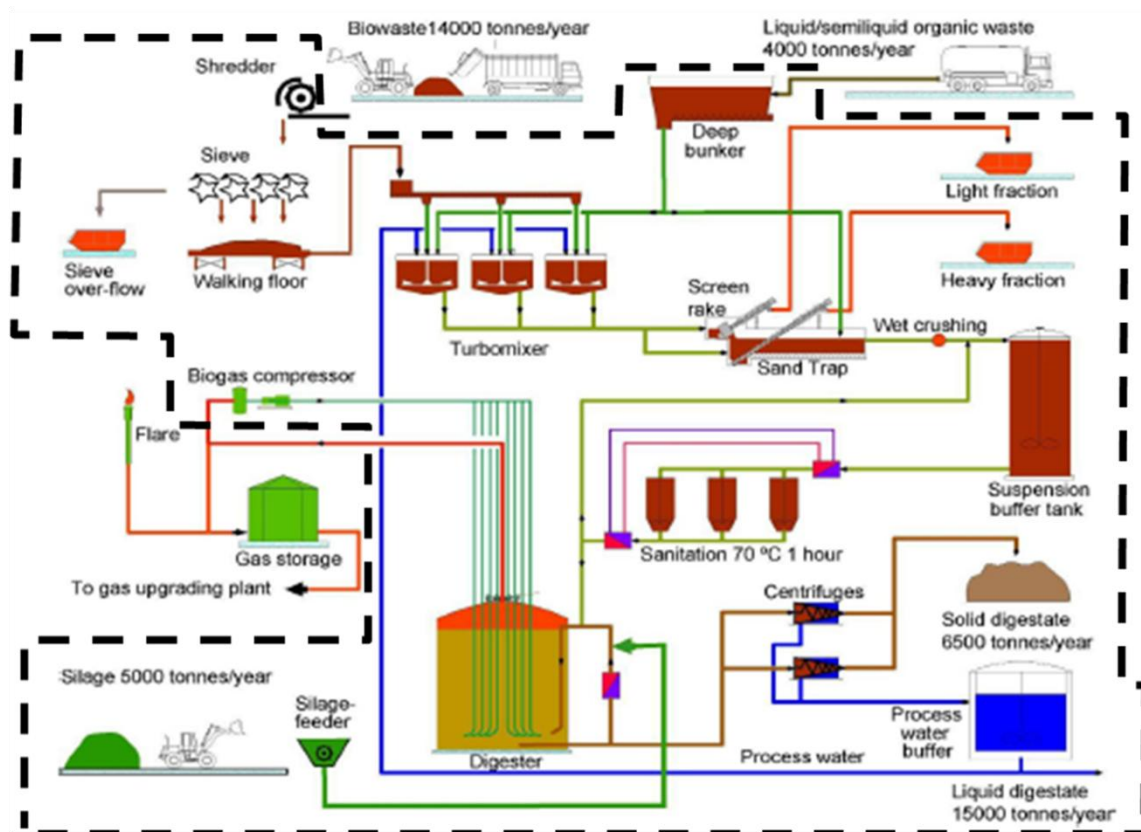
### 3.1.1 Anläggningsbeskrivning

Svensk Växtkraft driver en så kallad central samrötningsanläggning. Det vill säga substrat samlas in från flera olika källor och rötas centralt i en biogasanläggning. De substrat som behandlas idag är hushållsavfall, fettavskilningsslam och vallgrödor. Processen kan delas in i:

- mottagning,
- förbehandling,
- hygienisering,
- rötning,
- gasrening,
- uppgradering av biogasen,
- bioslamhantering och
- processventilation.

I Figur 1 ses energikartläggningens övergripande systemgränser innanför den svarta streckade linjen. Rening och uppgradering innefattas inte och även bränsleförbrukningen i maskiner som exempelvis diesel i hjullastaren i mottagningshallen har uteslutits.





Figur 1 Processchema biogasanläggningen Svensk Växtkraft, systemgränser innanför svart streckad linje.

Mottagningen består av tre mottagningslinor för substrat. En mottagningshall för hushållsavfall med en hjullastare som lastar substratet upp på ett vandrande golv som transporterar det vidare till krossen. En mottagningsficka för mottagning av flytande substrat. Samt en separat inmatning av vallgrödor som går direkt in till rötchkammaren via transportband och cirkulationspump.

Förbehandlingen består av flera samverkande steg. Först passerar hushållsavfallet en kross och en sikt. Därefter kommer tre turbomixrar där dispergering och sönderdelning sker. Oönskat material som plast, sand och ben sorteras bort i sikten och raken. Vandrande golv och skruvar används för substrattransporten medan pumpar transporterar flytande substrat och substratblandningen efter dispergering. I bufferttanken kan substratblandningen mellanlagras innan hygieniseringen och rötning. I tanken finns omrörare installerad och innan tanken finns en macerator. Maceratorn (benämns wet crushing i Figur 1) har till uppgift att minska partikelstorleken så att substratet uppfyller kraven för hygienisering.

Hygieniseringssteget består av tre hygieniseringstankar en inmatningspump och en utmatningspump. Processtegets utformning regleras av kraven på hygienisering i ABP-förordningen. Idag hygieniseras substratet i 70 °C under 1h. En mer detaljerad beskrivning av hygieniseringen hittas under kapitel 3.2 senare i rapporten.

Efter hygieniseringen röts substratet i rötchkammaren där omrörning sker med en gasomblandare. Biogas komprimeras och sprutas in i botten av tanken så att substratet blandas. Spillvärmens från omblandningen är tillräcklig för att hålla temperaturen över 37°C (mesofil process) varför ingen extra värme behöver tillföras. Uppehållstiden i rötchkammaren (HRT) är 20 dagar och processen matas kontinuerligt med substrat under 6 dagar i veckan året om.

Biogasen som bildas renas och uppgraderas till fordonskvalitet. Bioslammet som blir kvar som restprodukt efter rötningen centrifugeras och delas upp i en våt fraktion och en fast fraktion. En del av

processvattnet kan pumpas tillbaka in till processen igen och blandas med nytt substrat i mixern. Resten levereras tillbaka till jordbruket som biogödsel. Den våta fraktionen är rik på kväve medan den fasta är en fosforkälla.

All ventilationsluft på anläggningen måste behandlas för att reducera lukt. Den går genom en vattenskrubber och därefter igenom ett biofilter innan den släpps ut.

Det finns många siffror som kan beskriva processen i en biogasanläggning. I detta arbete ligger fokus på energianvändning varför en sammanställning av några relevanta anläggningsdata samlats i Tabell 1.

**Tabell 1** Beskrivande data om Svensk Växtkrafts biogasanläggning i Västerås.

Parameter	Parametervärde och enhet
Behandlingskapacitet per normaldag	240 m <sup>3</sup> substratblandning per dag
Behandlingskapacitet per år	21000 ton per år
TS-halt inkommande substrat	28 %
TS-halt efter spädning	7 %
Biogasproduktion per år	17000 MWh
Drift dagar per vecka	6 dagar per vecka

Västeråsanläggningen saknar i många fall mätning av parametrar som är användbara för elenergi kartläggning. Ström och spänning till respektive komponent mäts och loggas inte. Vissa komponenter är frekvensstyrda bet innebär att de går på en varierad effekt som kan kopplas till en viss styrfrekvens. Eftersom drifttiden för en viss styrfrekvens inte loggas finns ingen mening med att mäta upp sambandet mellan frekvens och effekt som skulle kunnat användas för energiberäkningar. Se vidare hur detta har använts i Mossberg (2007). På grund av en tidigare ombyggnation av värmeväxlingssystemet så finns däremot flera mätpunkter av temperatur och flöden i hygieniseringssteget. Detta underlättar värmeenergi kartläggningen av hygieniseringssteget och energijämförelsen av hygieniseringsmetoder avsevärt.

### 3.1.2 Datainsamling och beräkningar

Tillsammans med driftpersonal på anläggningen valdes de största elförbrukarna i processen ut. Strömmen in till dessa komponenter under vad som uppskattas som normaldrift mättes punktvis och drifttiden under ett normaldygn uppskattades tillsammans med personalen. Spänningen antogs till 400V och effektfaktorn till 0,9 därefter beräknades energiförbrukningen enligt formel 1. För att räkna ut kostnaderna för elförbrukningen antogs elpriset vara 0,75 kr/kWh (pers. medd. Leksell 2010). Alla beräkningarna utfördes i ett Excel-dokument där elförbrukning och fördelning av elförbrukning på olika processteg i anläggningen redovisas. Beräkningsprogrammet byggdes upp i Microsoft Office Excel<sup>®</sup> som är användarvänligt och som ofta finns tillgängligt på företag vilket medför att det kan användas av fler personer. På detta sätt kan personal på anläggningen själva arbeta vidare med energikartläggningen.

Förutom elenergi så kartlades också värmeförbrukningen på hela anläggningen i synnerhet värmeförbrukningen i hygieniseringen. Den detaljerade studien av hygieniseringssteget beskrivs längre fram. Värmeenergiförbrukningen på anläggningen delades upp mellan hygieniseringen, rötningen och uppvärmning av lokaler. Rötningen hålls varm tack vare överskottsvärme från gasomröraren och förbrukar ingen fjärrvärme varför denna endast belastar elförbrukningen på anläggningen (för

beskrivning av gasomrörning se kapitel 3.1.1 Anläggningsbeskrivning). Eftersom inga planer på ombyggnation av detta steg planeras i dagsläget så undersöktes inte värmebalansen i rötkammaren vidare. Lokaler och hygienisering värms däremot med fjärrvärme varav den absolut övervägande delen går till hygieniseringen. För att beräkna kostnaderna för värmeförbrukningen antogs priset för fjärrvärme vara 0,75 kr/kWh (Trad 2010).

I slutet av arbetet så togs även värden för specifik el- och värmeförbrukning fram för att lättare kunna jämföra resultatet med resultatet från andra studier se formel 2. Beräkningarna utgår från total energiförbrukning under ett normaldygn som delas med massan för mottaget substrat per normaldygn eller massan för substratblandning efter dispergering under ett normaldygn. Torrsubstanshalten för substratblandningen är omkring 7 %. Med formel 3 beräknas energiförbrukning som andel av producerad biogas. Här har uppgifter om energiinnehåll i årlig produktion av biogas enligt Tabell 1 delats på driftdagar under ett år. Detta har jämförts med den uppmätta elenergiförbrukningen under ett normaldygn.

## 3.2 Energiinventering av nuvarande hygienisering

En uppdaterad översiktsbild av hygieniseringssteget togs initialt fram och denna processöversikt kan ses i Figur 2 längre ned i detta kapitel.

Potentiella och troliga källor till värmeförluster i hygieniseringssteget kartlades och värderades. Den mest uppenbara värmeförlusten är kylningssteget innan rötkammaren. Genom avvägningar och dialog med erfaren personal på anläggningen samt även genom kontakt med Uppsala universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet identifierades ytterligare några troliga källor till värmeförluster. Det är viktigt att kartlägga de största källorna till värmeförluster i hygieniseringssteget. Dels för att kunna energieffektivisera befintlig process men även för att kunna simulera relevanta aspekter av energiförbrukningen i den alternativa hygieniseringsmetoden.

Efter övervägande så valdes följande källor till värmeförlust att undersökas.

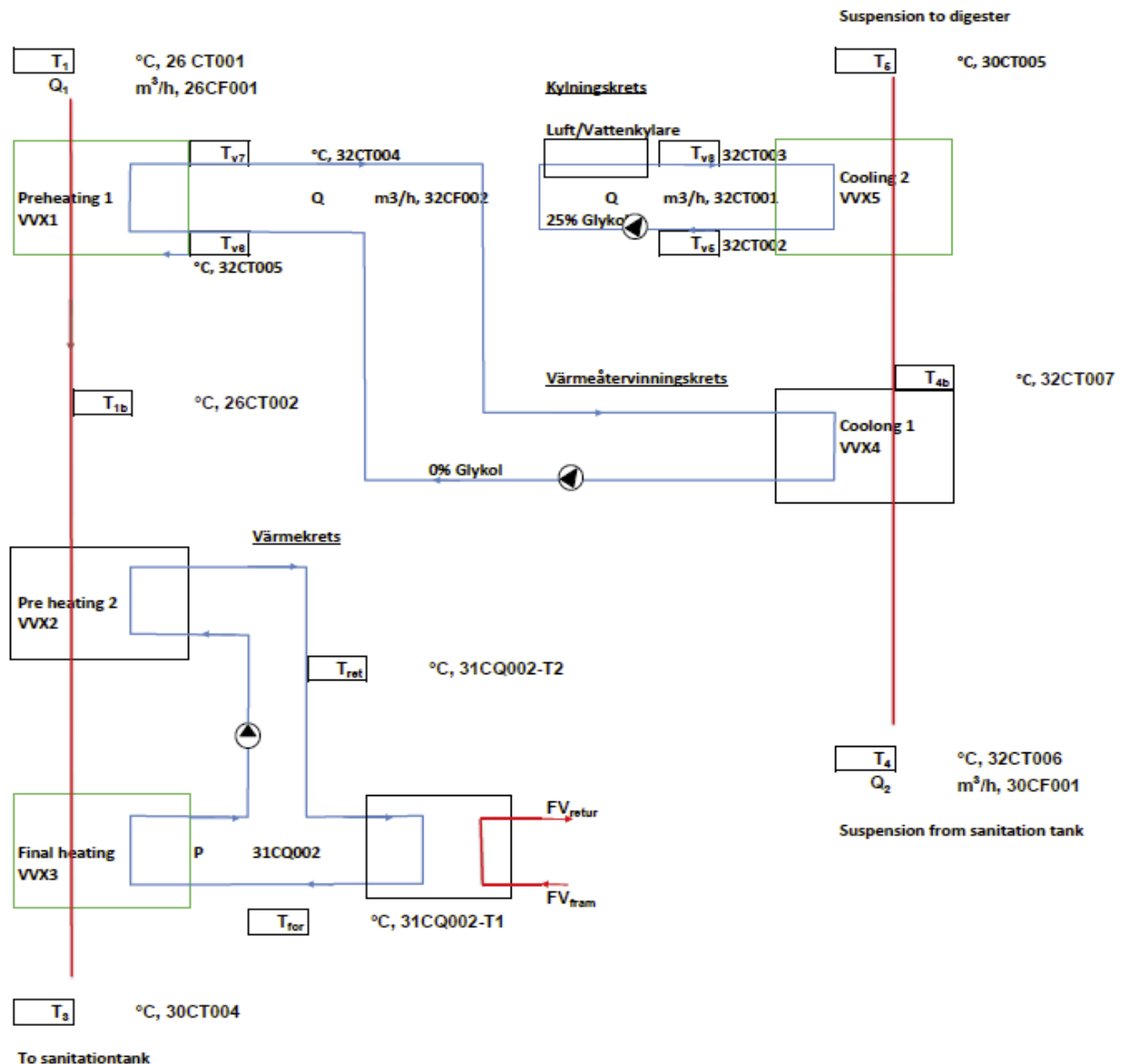
- Kylningen av substratet efter hygieniseringen, innan rötningen.
- Ledningsförluster i tankarna genom väggar, topp och botten.
- Värmeförluster genom ventilation i toppen på hygieniseringstankarna.
- Ledningsförluster genom benen på hygieniseringstanken.
- Undersöka eventuella andra konstruktionsdelar som bryter igenom isoleringen (köldbryggor).

Det är också viktigt att vara öppen för att ytterligare källor till förluster kan upptäckas under arbetets gång. Om de är betydande bör de tas med i undersökningen.

### 3.2.1 Processbeskrivning

Hygieniseringen består av tre hygieniseringstankar med mekaniska omrörare, en inmatningspump, en utmatningspump och ett antal värmeväxlare se översiktsbild i Figur 2. Först matas substratet in och förvärms via värmeåtervinningskretsen. Därefter värms substratet upp i en tvåstegsvärmeväxlare till önskad hygieniseringstemperatur vilket idag är ca 75°C. Substratet fylls sedan upp i en av de tre hygieniseringstankarna (tankarna har utelämnats från översiktsbilden) vilket tar ungefär en timme. Sedan hygieniseras substratet i en timme och tömningen tar ytterligare en timme. Varje tank rymmer 16 m<sup>3</sup> men fylls bara till omkring 80 %. Kylkretsen efter hygieniseringen har installerats för att hålla

nere temperaturen i rötkammaren så att mikroorganismerna skall trivas. Värmen leds bort utan att utnyttjas och kylningen är en ren förlust.



Figur 2 Processchema av hygieniseringen på Svensk Växtkraft biogasanläggning i Västerås.

Man har tre hygieniseringstankar för att få ett kontinuerligt flöde av substrat genom hygieniseringssteget. Det är alltid en tank som fylls, en tank som hygieniseras och en som töms. Alla tankar har en rörledning in och en ut som förgrenar sig till varje tank. I tankens topp finns en utgång för ventilationsluft som ansluter till övrig processventilation. Tankarna står på isolerade stälben och på sidorna har tankarna runda inspektionssluckor. Tankarnas form är som en hög cylinder med välvd botten och plan cirkulär topp.

### 3.2.2 Datainsamling och beräkningar

Beräkningarna bygger på data från temperaturgivare och flödesmätare som märkts ut i Figur 2. Rutor med T eller Q betecknar kontinuerlig temperatur- respektive flödesmätning. Dessutom mäts

temperaturen i varje hygieniseringstank där tank ett har givare  $T_{s1}$ , tank två  $T_{s2}$  och tank tre  $T_{s3}$ . Dagen innan data samlades in rengjordes alla rörledningar och värmeväxlare för att få så hög värmeväxlande prestanda som möjligt.

Förlusterna i kylningssteget beräknades genom att temperaturer före och efter kylning ( $T_{4b}$  och  $T_5$  i Figur 2) samt substratflödet ( $Q_2$  i Figur 2) mättes under ett normaldygn. Värden fördes sedan in i formel 4 för värmemängdsändring.

De totala värmeförlusterna under en hygienisering beräknades som värmemängdsändringen mellan hygieniseringens start och slut enligt formel 4 med temperaturvärde för hygieniseringens start och slut. Volymen hygieniserat substrat beräknades som summan av flödet  $Q_1$  under fyllningen av aktuell tank. För beräkningar av totala värmeförluster i hygieniseringstanken under ett normaldygn så multiplicerades förlusterna under en medelhygienisering med antalet satser som behandlas per normaldag (se Tabell 3 antal satser i scenario 1a).

Konduktionsförluster genom tankens isolerade hölje beräknades generellt med formel 8. Värmeledningskoefficient användes för de material som tankarna angavs vara uppbyggda av enligt ritningarna. Insidan och utsidan av tankarna är tillverkad av kolfiberarmerad plast. Plasten betecknas i ritningen med VE som står för vinylester och har värmeledningsförmåga 0,25 W/mK (The Engineering Toolbox 2011). Det isolerande materialet mellan väggarna består till största del av polyuretanskum (betecknas PU). Detta isolerande material har värmeledningsförmåga 0,023 W/mK (The Engineering Toolbox 2011). Dessutom påverkas konduktion av geometrisk form. För beräkning av konduktion genom tankens cylindriska sidoväggar används formel 9 och formel 10, för välvd botten används formel 11 och formel 12 samt för den plana toppen används formel 13 och formel 14. Temperaturen på tankens inre yta antas vara densamma som temperaturen på substratet ca 73°C ( $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$  och  $T_{s3}$ ). Ytemperaturen på utsidan ca 20°C mättes med en speciell mätare för detta ändamål (PT100-P655). Dimensioner på tanken och de olika materialen återfinns i dimensionstabellen Tabell 1.

**Tabell 2 Dimensionstabell hygieniseringstankar.**

Ritningsdel	Mått [mm]
Innerplast	5
Isoleringstjocklek	100
Ytterplast	5
Höjd cylindrisk vägg	3700
Radie cylinder	1200
Höjd på delsfär botten	995
Radie på sfärisk botten	2340
Radie på cirkulär inspektionslucka	400

I toppen av varje tank finns en utgång för ventilationsluft. Denna ventilation är forcerad och ansluter så småningom till anläggningens övriga ventilationssystem. På grund av att ventilationen är gemensam så är luftflödet från hygieniseringen okänt. För att fastställa ventilationsflödet från hygieniseringen utfördes mätningar. Till mätningarna användes ett Prantls rör och genom att multiplicera uppmätt hastighet med rörets tvärsnittsarea kunde flödet beräknas (formel 17). Fukthalten och även temperaturen var planerade att mätas med en hygrometer. Utifrån ångbildningsvärme vid aktuella förhållanden skulle den förlorade värmen via ånga genom ventilationen kunna beräknas. Eventuella andra kemiska processer eller gaser som kan påverka värmebalansen antogs vara av mindre betydelse

i hygieniseringen. I detta experiment visade det sig dock att ytterligare mätningar skulle vara nödvändiga för att fastställa ventilationsförlusterna. Luftens mättnadstemperatur skulle behöva mätas med annan utrustning på grund av de tuffa mätförhållandena i ventilationsröret. Eftersom detta skulle tagit ytterligare tid i anspråk och jämförelsen av konduktiva förluster var av huvudsakligt intresse utelämnades vidare mätningar.

Värmeledning genom hygieniseringstankens ben ska om konstruktionen är korrekt vara liten. Om benen har fästs på ett sådant sätt att de tränger igenom isoleringen kan så kallade köldbryggor uppstå och en avsevärd mängd värme ledas bort genom isoleringen (Abel & Elmroth 2006, 233). Hur mycket värme som leds bort genom benen måste i så fall också kartläggas. Ett sätt att undersöka köldbryggor är genom att använda en värmekamera eller IR-kamera. Här mättes istället temperaturen på tankarnas yttre ytor med en särskild yttemperaturgivare (PT100-P655). Eventuella tydliga variationer i isoleringskapacitet noterades. Totalt mättes temperaturen på 28 punkter på varje tank. Mätpunkterna på hygieniseringstanken fördelades så jämt som möjligt för att försöka täcka så stor del som möjligt av manteln. Utförandet kan ses som en manuell form av fotografering med IR-kamera.

Den konstruktionsdetalj som utmärkte sig var den oisolerade inspektionsluckan på tankens sida med en yttemperatur som var drygt 10°C högre än resterande tankhölje. Konduktion genom luckan beräknades enligt formel 13 och formel 14 men med dimensioner för luckan enligt Tabell 2 och utan isolering.

Under arbetets gång upptäcktes och inkluderades också värmeförluster i rörledningen in till och ut ur hygieniseringstanken under fyllning respektive tömning av tanken. Detta efter att en betydande temperaturdifferens upptäckts mellan temperatur  $T_3$  i Figur 2 och temperaturen i hygieniseringstankarna  $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$  och  $T_{S3}$ . Flödet  $Q_1$  i Figur 2 mättes och temperaturdata fördes in i formel 20 varvid temperaturen alldeles innan tanken  $T_{3b}$  erhöles. Värmemängdsändringen och därmed värmeförlusten mellan  $T_3$  i Figur 2 och  $T_{3b}$  beräknades för substratet med formel 4. På samma sätt beräknades förlusterna i röret ut från tanken. Då används istället temperaturen i tanken ( $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$  och  $T_{S3}$ ) vid hygieniseringens slut, temperaturen innan värmeåtervinningen  $T_4$  samt flödet  $Q_2$  i formel 4 för värmemängdsändring. För att beräkna förlusterna under ett normaldygn multiplicerades medelförlusten under en fyllning respektive tömning med antalet satser per normaldygn.

Elenergin som förbrukas i hygieniseringen härrör från omrörningen och pumpning av substrat in till och ut från tankarna.

### 3.3 Energijämförelse av två hygieniseringsmetoder

Olika hygieniseringsmetoder kan vara svåra att jämföra. Här är det relativt okomplicerat eftersom metoderna bygger på samma grundprinciper. Substratet skall upphettas till en viss temperatur och hålla denna under en viss tid. Undersökningen blir främst en jämförelse av värmetransporter. Ingen förändring av tankarnas prestanda eller dimensionering av övrig utrustning kommer att genomföras. Därför blir ingen utförlig jämförelse av elenergiförbrukning aktuell.

Förutom en jämförelse under nuvarande förutsättningar kommer scenarion med ökad behandlingskapacitet att undersökas. När behandlingskapaciteten ökar antas att fler tankar, omrörare och pumpar med samma dimensioner och prestanda installeras. Detta är inte troligt i en verklig ombyggnation men är en tillräckligt god grundförutsättning för en första jämförelse av hygieniseringsmetoderna och behandlingskapaciteten.

#### 3.3.1 Scenarion

Av de flertalet alternativa hygieniseringsmetoder som finns (Norin 2007) har Svensk Växtkraft bedömt att hygienisering i 55 °C under 10h (lågtemperaturhygienisering) är det idag mest intressanta alternativet att undersöka. Dessutom är anläggningen intresserad av att undersöka effekterna av en ökad behandlingskapacitet per år.

Med utgångspunkt i detta jämfördes värmeförbrukningen för totalt fyra scenarion. Två där hygieniseringsmetod varieras och där behandlingskapaciteten dels är 21 tusen ton per år och dels 31 tusen ton per år.

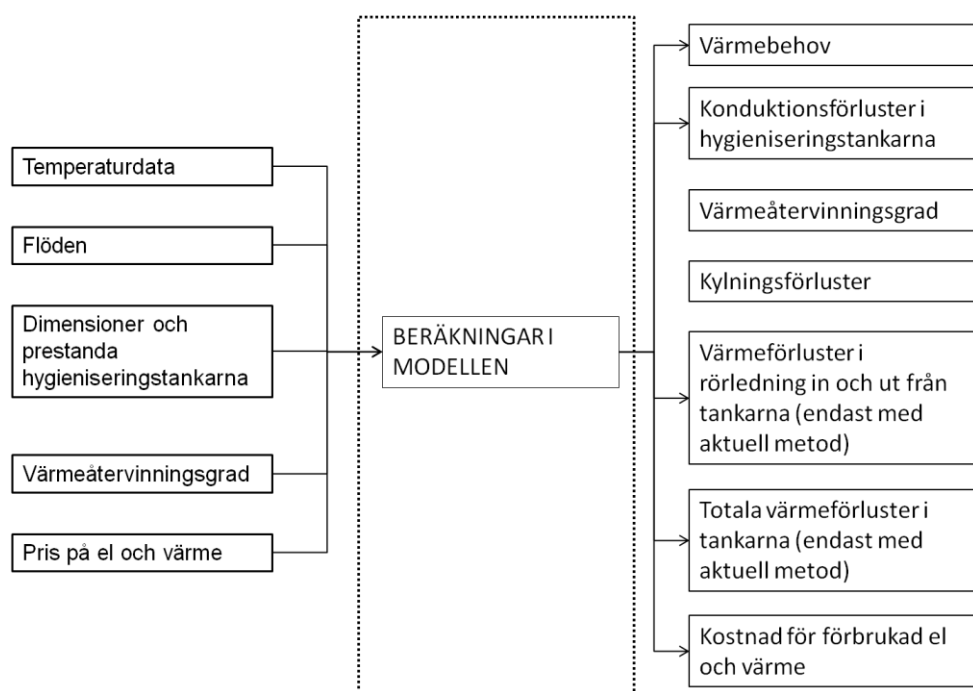
**Tabell 3. Beskrivning av scenarion som skall jämföras.**

<p>Scenario 1a</p> <p>Aktuell hygieniseringsmetod 70 °C i 1h och behandlingskapacitet ca 240 m<sup>3</sup>substratblandning per dygn med TS 7 % eller 21 tusen ton mottaget substrat per år. Det betyder att ca 17 satser måste passera hygieniseringssteget varje dygn.</p>	<p>Scenario 1b</p> <p>Samma behandlingskapacitet som i 1a men förändrad hygieniseringsmetod till 55 °C i 10h. Här antas att ändringen av hygieniseringsmetod kommer att ske med befintliga dimensioner av tankarna.</p>
<p>Scenario 2a</p> <p>Samma hygieniseringsmetod som 1a alltså 70 °C i 1h men en ökning av årlig behandlad mängd substrat med 10 tusen ton per år. Detta betyder att man behandlar 380 m<sup>3</sup> substratblandning per dygn med TS halt 7 % eller 31 tusen ton mottaget substrat per år. Här måste ca 34 satser passera hygieniseringen varje dygn. Förutsatt att tankarna har samma dimensioner som i dagens system.</p>	<p>Scenario 2b</p> <p>Här förändras både hygieniseringsmetoden till 55 °C i 10h och behandlingskapaciteten. Detta betyder att man behandlar 380 m<sup>3</sup> substratblandning per dag med TS 7 % eller 31 tusen ton substrat per år. Här måste ca 34 satser passera per dygn behandlas. Tankarnas dimensioner förutsätts fortfarande vara oförändrade.</p>

All data som anges om exempelvis behandlingskapacitet per dag, satser per dag och TS-halt anges som ett genomsnittligt värde. Det antas att årlig behandlingskapacitet fördelar sig lika över året.

### 3.3.2 Modell

Själva modellen av hygieniseringssteget byggdes upp i MathWorks beräkningsprogram Matlab<sup>®</sup>. En utförlig beskrivning av modellen redovisas i Appendix 1. En översikt av hur modellen ser ut ges i Figur 3.



Figur 3 Översikt av beräkningsmodellen.

Modellen är en fysikalisk modell som bygger på de termodynamiska samband som presenteras i teorikapitlet.

### 3.3.3 Validering av modellen

Genom att jämföra summan av beräknade konduktionsförluster och förluster via ventilationen med totala uppmätta värmeförluster i hygieniseringen skulle modellen på ett grovt sätt ha kunnat valideras se formel 20. Totala förlusterna i hygieniseringen beräknas utifrån uppmätt temperatur i hygieniseringstanken vid start och slut som sätts in i formel 4 för värmemängdsändring. Konsekvensen av att ventilationsförlusterna inte kunde mätas var att möjligheten att verifiera modellen på detta sätt gick förlorad.

Ytterligare en möjlighet att validera modellen hade kunnat vara att jämföra det beräknade värmebehovet med den uppmätta tillförda värmemängden i uppvärmningskretsen. Värmebehovet beräknas genom att föra in värden för temperaturdifferensen mellan  $T_{1b}$  och  $T_3$  enligt Figur 2 i formel 4 för beräkning av värmemängdsändring. Resultatet skulle kunna jämföras med uppmätt effekt  $P$  enligt Figur 2 i uppvärmningskretsen och skillnaden borde vara liten. Tyvärr visade sig skillnaden vara stor och efter undersökningar konstaterades att effektmätaren i uppvärmningskretsen till hygieniseringen troligtvis mätte fel på grund av felmontering.

Modellen fick istället undersökas under uppbyggnadens gång. Här valdes att försöka fokusera på att konsekvenstesta modellen. Det vill säga undersöka om beräkningarna var konsekventa eller om resultatet betedde sig slumpartat. Även om modellen eventuellt inte kan beräkna den faktiska energiförbrukningen korrekt så kan den användas för att jämföra två scenarion om den räknar "lika fel" varje gång. De parametrar som framförallt undersöktes var hygieniseringstemperaturen, återvinningsgraden och substratflödet och dess inverkan på resultatet. Konduktionsförlusterna i tankarna under hygienisering beräknas på två olika sätt för aktuell hygienisering och alternativ hygieniseringsmetod. Beräkningarna beskrivs längre ned i detta kapitel men resultatet blir att konduktionsförlusterna blir lite överskattade i beräkningarna för alternativ hygieniseringsmetod. Alltså förlusterna som beräknas är lite högre än de verkliga förlusterna kan förväntas vara i den alternativa hygieniseringsmetoden.



### 3.3.4 Beräkningar

Värmeåtervinningsgraden kan antingen anges manuellt som en procentsats i modellen eller beräknas enligt formel 7. Då räknar man alltså ut vilken värmemängd som tillförs via återvinningskretsen och dividerar med värmen som tillförs via uppvärmningskretsen (Figur 2).

Den fjärrvärme som förbrukas är summan av tillförd värme i uppvärmningskretsen och eventuell varmhållning av substratet under hygieniseringen. Värmebehovet beräknas med formel 4 och påverkas av värmeåtervinningsgraden.

Under själva hygieniseringen beräknas konduktionsförluster i hygieniseringstankarna. I nuvarande hygienisering tillförs ingen värme utan substratet som matas in har ett visst värmeöverskott för att hålla specificerad hygieniseringstemperatur. Konduktionsförlusterna beräknas för respektive konstruktionsdel enligt beskrivning i "Energiinventering av nuvarande hygienisering".

I den alternativa hygieniseringsmetoden kommer varmhållning under hygieniseringen att bli aktuellt vilket bidrar till det totala fjärrvärmebehovet. Värmetransport ut ur tanken under alternativ hygienisering kräver dessutom att värmeövergångskoefficienten beräknas enligt formel 15. Genom att utnyttja att konduktionsförlusterna i tankarna under aktuell hygienisering går att beräkna samt att medeltemperaturen på tankarnas yta (ca 20°C) och temperaturen i rummet går att mäta (ca 18°C), kan värmeövergångskoefficienten beräknas. Värmeövergångskoefficienten blir genom detta tillvägagångssätt överskattad vilket orsakar att beräkningarna av värmetransport genom väggen i formel 16 också blir något överskattade. Det antas att temperaturen på tankens inre yta är densamma som hygieniseringstemperaturen (55 °C) och temperaturen i processhallen antas vara konstant (18°C).

Med formel 4 beräknas kylbehovet som värmemängdsändringen mellan temperaturmätare  $T_{4b}$  och  $T_5$  samt flödet  $Q_2$  (allt enligt Figur 2).

Elförbrukningen i hygieniseringssteget beräknas utifrån resultatet av energikartläggningen och den specifika elförbrukningen (kWh/ton) för pumpar och omrörare i hygieniseringen. Specifik elförbrukning multiplicerar med behandlingskapaciteten för ett normaldygn för att få fram energiförbrukningen per normaldygn.

Avslutningsvis beräknas kostnaden för förbrukad fjärrvärme och förbrukad el. Som grund ligger ett fjärrvärmepris på 0,75 kr/kWh och elpris på 0,75 kr/kWh.

## 4 Resultatredovisning

Resultat redovisas dels för energikartläggningen av anläggningen, dels för detaljstudien av hygieniseringen och dels för energijämförelsen av hygieniseringsmetoder. Elförbrukningen är fördelad på en rad olika komponenter och har tagit en större plats i den översiktliga energikartläggningen. Värmeförbrukningen är fokuserad till i huvudsak hygieniseringen varför denna redovisas separat.

### 4.1 Energiflöden på anläggningen

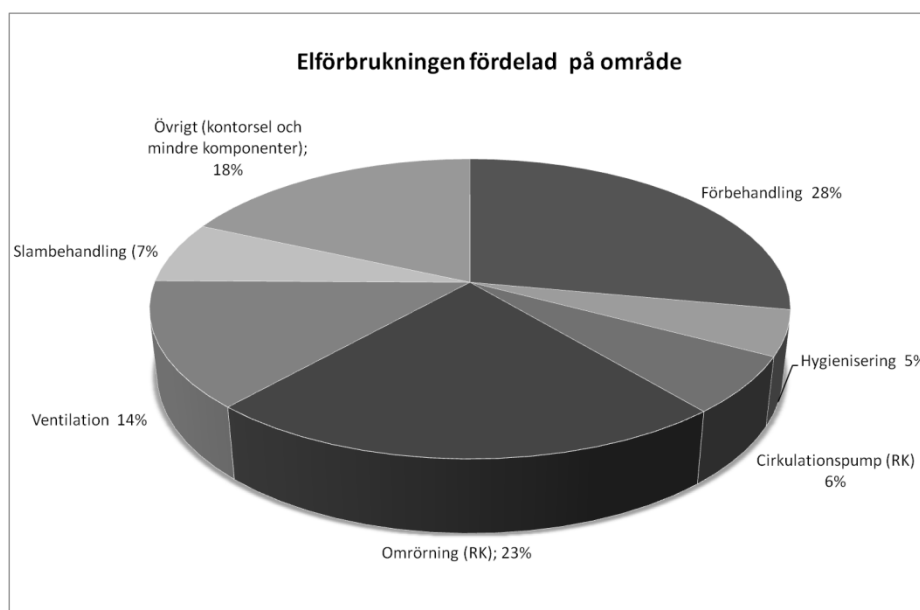
Den totala energiförbrukningen under ett normaldygn med dagens process var enligt mätarställning 4691 kWh (16887 MJ) el och 6980 kWh (25128 MJ) värme. Avläsningen av elförbrukning skedde den 1-2 mars 2011 och avläsningen av fjärrvärmeförbrukning skedde den 18-19 maj 2011. Enligt beräkningar i modellen över hygieniseringssteget som bygger på temperatur- och flödesdata från den 1-2 mars 2011 var värmeförbrukningen i hygieniseringssteget 7126 kWh (25654 MJ).

#### 4.1.1 Elförbrukning

Elenergiförbrukningen i detta arbete beror direkt på beräknad effekt och uppskattad drifttid under vad som tillsammans med driftpersonal betraktas som normaldrift och normaldygn. Effekten har beräknats utifrån punktmätningar.

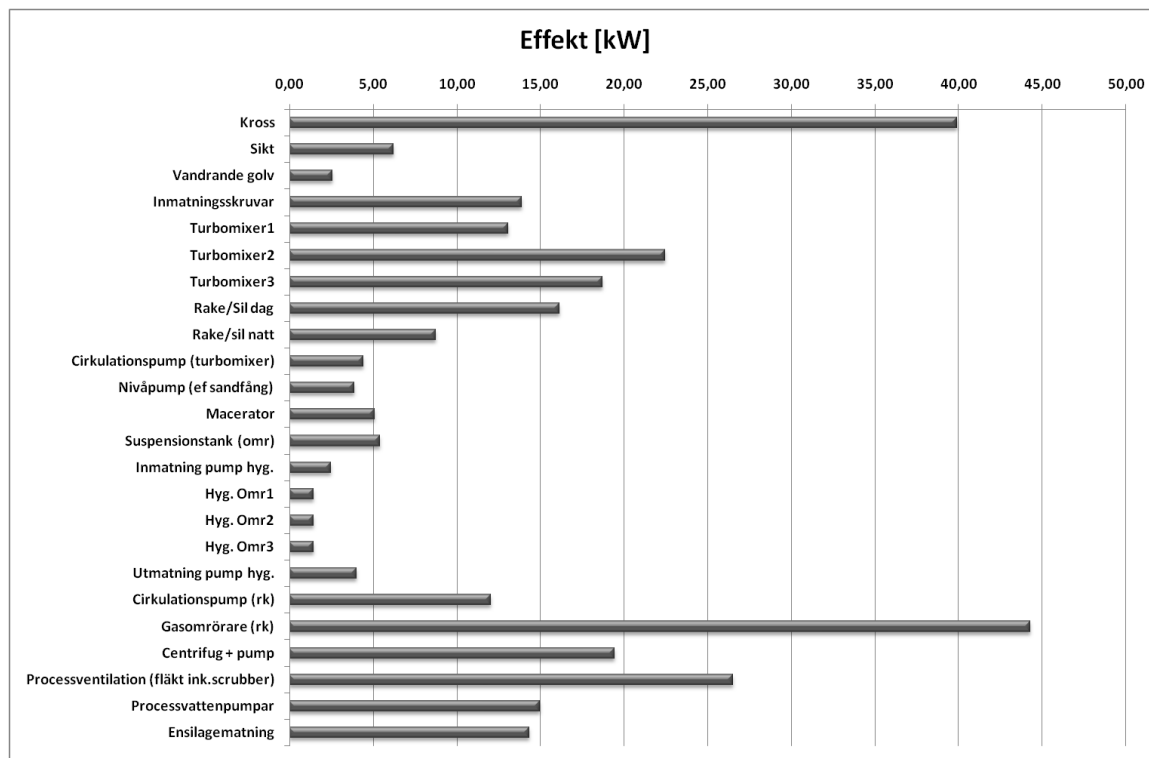
De processområden som har stor elförbrukning är förbehandling inklusive hygienisering och rötkamardriften. En post kallas "Övrigt" och omfattar kontorsel och mindre komponenter. Den posten står för en betydande del av elförbrukningen. Denna andel har beräknats genom att summan av de stora komponenternas elförbrukning subtraherats från uppmätt elförbrukning under ett normaldygn. Det har framkommit att posten "Övrigt" bland annat omfattar utrymmen som har installerad elvärme. Flera sådana små men energiineffektiva komponenter kan tillsammans bidra till en avsevärd del av energiförbrukningen. En djupare analys av dessa förlustkällor har utelämnats i detta arbete men diskuteras senare i rapporten.

Nedan (Figur 4) kan man se hur elförbrukningen fördelar sig på de olika processområdena. Processområdena består av komponenter som har liknande eller samma funktion i processen.



Figur 4 Fördelning av energiförbrukning på processområden.

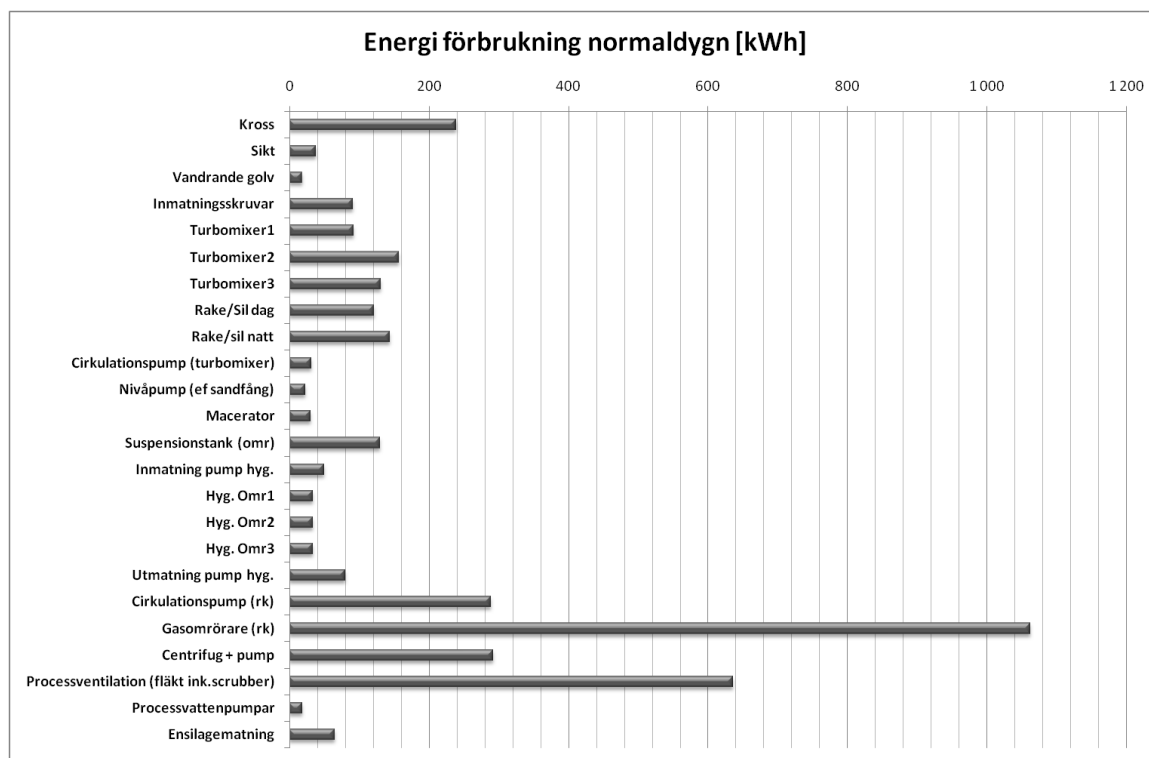
Nedan (Figur 5) redovisas effekten för de ur energisynpunkt viktigaste komponenterna i anläggningen. Effekten gäller för punktvisa mätningar av strömmen in till respektive komponent och normaldrift enligt metodkapitlet.



**Figur 5. Effekt under normaldrift för storförbrukande komponenter.**

De komponenter som utmärker sig är krossen som finns installerad i mottagningshallen för hushållsavfallet och gasomröraren i rötammaren. Andra komponenter som också har hög uppmätt effekt är processventilationen och mixer som är en del av förbehandlingen. I slambehandlingen används centrifug och pump för att avvattna rötresten men bara ibland. Här har uppmätta värden för när centrifugen och pumpen användes redovisats. Använd effekt är hög men är inte utmärkande.

Den angivna effekten antas vara konstant under hela den uppskattade drifttiden under ett normaldygn. Utifrån denna förenkling har energiförbrukningen beräknats och resultatet redovisas i figur 6.



Figur 6. Energiförbrukning för respektive komponent under normaldrift och normaldygn.

Gasomröringen i rötkammaren utmärker sig även här i diagrammet för energiförbrukning. Den har både hög effekt och mycket drifttid vilket gör att den förbrukar klart mest energi per dygn. Även processventilationen utmärker sig med hög energiförbrukning. Därefter följer krossen, centrifug med tillhörande pump och även cirkulationspumpen i rötkammaren har en relativt hög energiförbrukning. Alla dessa komponenter har gemensamt att de har lång drifttid per dygn.

En mixer däremot arbetar under kortare tider och förbrukar därför under ett normaldygn inte anmärkningsvärt mycket energi.

#### 4.1.2 Värmeförbrukning

Den absolut största delen av värmen som förbrukas på anläggningen går till hygieniseringssteget. En mindre del går till uppvärmning av lokaler. Hur mycket har tyvärr inte kunnat fastställas i detta projekt. Detta eftersom fjärrvärmeförbrukningen har avlästs mellan den 18-19 maj 2011 medan beräknad värmeförbrukning i hygieniseringssteget tagits fram med indata från den 1-2 mars 2011. Fjärrvärmeförbrukningen enligt mätare var 25128 MJ medan den beräknade värmeförbrukningen i hygieniseringen var 25654 MJ.

#### 4.1.3 Specifik energiförbrukning

För att kunna jämföra energiförbrukningen med resultat från andra rapporter så har några värden på specifik energiförbrukning tagits fram. Eftersom ingen standard för energikartläggning på biogasanläggningar finns så har specifik energiförbrukning presenterats med avseende på vilka rapporter som resultatet skall jämföras med. Enheter är anpassade till andra undersökningars val av enheter. Det bör påpekas att substrat är mottagen råvara till anläggningen innan spädning medan substratblandning är substrat efter dispergering.

Tabell 4 Specifik energiförbrukning.

Specifik elförbrukning	MJ/ton substratblandning	kWh/ton mottaget substrat	% av producerad biogas
Elförbrukning totalt på anläggningen enligt mätare (ink. kontorsel)	70	64	8,6
Elförbrukning för processen enligt beräkningar (inkluderar bara storförbrukare av el)	58	52	7,0

Specifik värmeförbrukning	MJ/ton substratblandning	kWh/ton mottaget substrat	% av producerad biogas
Fjärrvärmeförbrukning för hela anläggningen enligt mätare.	105	95	12,8
Värmeförbrukningen för hygieniseringssteget enligt beräkningar.	107	97	13,1

Den totala elförbrukningen har avlästs från mätare och inkluderar även kontors el samt alla andra elförbrukande komponenter på anläggningen. Elförbrukningen för processen är något underskattad eftersom den enbart inkluderar stora förbrukare av el och utesluter de små komponenterna. Fjärrvärmeförbrukningen enligt mätare och värmebehovet enligt beräkningar grundar sig på dataunderlag från två helt olika dygn nämligen den 18-19 maj respektive 1-2 mars 2011.

## 4.2 Energiflöden i hygieniseringssteget

Kartläggningen av dagens hygieniseringssteg (70 °C under en timme) har givit information om värmeförlustkällor i hygieniseringen. De källor till värmeförluster som har upptäckts följer nedan.

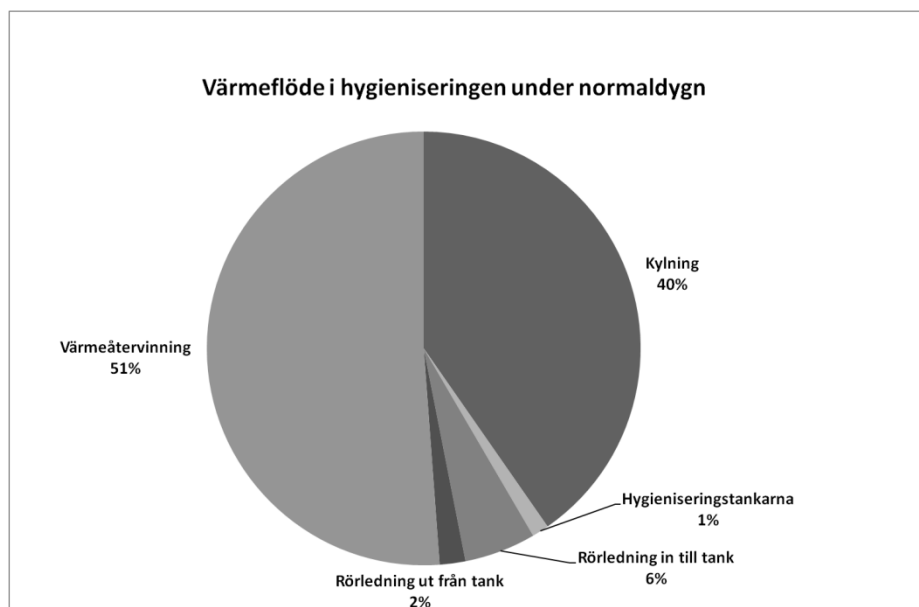
- Kylning av substratet innan rötkammaren.
- Ledningsförluster genom tankens ytterhölje.
- Köldbrygga i form av oisolerad inspektionslucka på tankarnas sidor.
- Värmeförluster i oisolerad rörledning in till och ut från hygieniseringstankarna.

Dessutom misstänks en stor del av värmeförlusterna i hygieniseringstankarna under hygienisering bero på att ånga ventileras bort. Inga avsevärda ledningsförluster har kunnat upptäckas via hygieniseringstankarnas ben.

Nedan följer en redovisning av energiinventeringen i nuvarande hygieniseringssteg med aktuell metod. Därefter redovisas jämförelsen av dagens hygieniseringsmetod med lågtemperaturhygienisering, varierad behandlingskapacitet och slutligen varierad värmeåtervinningsgrad.

#### 4.2.1 Värmeförlust

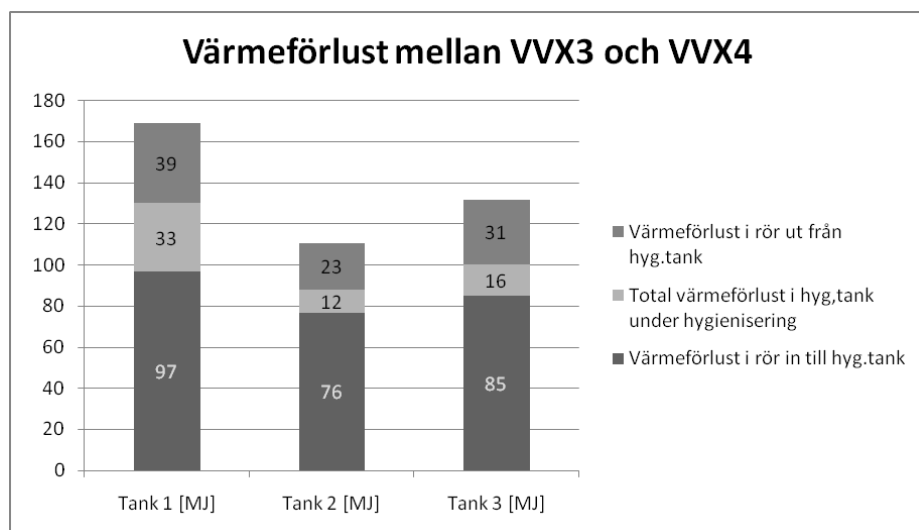
Den värme som tillförs substratet i uppvärmningssteget går dels förlorad i ovan nämnda förlustkällor, en del av värmen återvinns och ytterligare en del blir kvar i substratet och går vidare in i rötkammaren. Summan av värmeförluster och värmeåtervinning utgör tillsammans de totala värmetransporter som sker mellan substratet och omgivningen i hygieniseringssteget. Fördelningen mellan dessa värmetransporter redovisas i Figur 7 nedan.



Figur 7. Fördelningen av värmetransporter mellan substratet och omgivningen i hygieniseringssteget.

Resultatet är både ett underlag för att identifiera möjliga energibesparande åtgärder men även till hjälp för att bygga upp modellen av hygieniseringssteget senare i projektet.

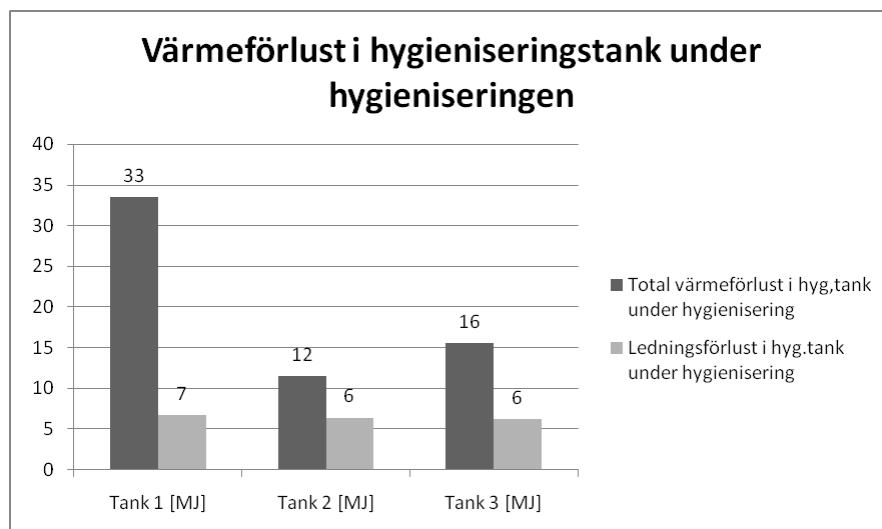
I Figur 8 ses totala värmeförluster som uppmäts mellan uppvärmningssteget och fram till värmeåtervinningskretsen (se Figur 2 för beskrivning av hygieniseringssteget). Totala förluster i hygieniseringstanken inkluderar alla förluster under en hygieniseringssats. Samtliga förluster är resultatet av att temperaturer och flöden har mätts under en hygieniseringssats i respektive tank. Alltså resultatet representerar en form av stickprov.



**Figur 8. Värmeförlust mellan uppvärmnings- och värmeåtervinningssteget under en hygienisering (hyg.tank=hygieniseringstankt).**

I samtliga tre tankar är värmeförlusterna i rörledningen in till hygieniseringen större än värmeförlusterna under själva hygieniseringen. Även förlusterna i rörledningen ut från hygieniseringen är större än totala förlusterna under själva hygieniseringen.

Av de förluster som kunnat uppmätas i hygieniseringstanken har en del kunnat förklaras som konduktiva förluster. I samtliga fall har dock de konduktiva förlusterna utgjort mindre än 50 % av totala värmeförlusterna under hygieniseringen. Den största orsaken till värmeförluster i hygieniseringstankarna under hygieniseringen är fortfarande inte fastställd se Figur 9.



**Figur 9 Värmeförlust i hygieniseringstankarna under en hygienisering (hyg.tank = hygieniseringstank).**

Det har framkommit under arbetets gång att den troligaste källan till den värmeförlust som inte är konduktion är värmeförluster via ventilationen. Personal på anläggningen vittnar om att man ibland kan se att det är någon form av ånga som går ut med ventilationsluften. Tidigare erfarenheter på anläggningen har också visat att minskad ventilation har lett till minskade värmeförluster i hygieniseringstankarna under hygienisering. Hur mycket som försvinner den vägen har den här undersökningen inte lyckats mäta på grund utav mättekniska problem.

## 4.2.2 Förbrukad värme och el

Den totala värmeförbrukningen i hygieniseringen är beräknad utifrån temperatur- och flödesdata från den 1-2 mars 2011 då utomhustemperaturen var ca -3 °C. Energiförbrukningen för normaldygn har därefter multiplicerat med antalet drift dagar per år för att få fram en uppskattad årsförbrukning. Hygieniseringen står för den absolut största värmeförbrukningen i Svensk Växtkrafts biogasanläggning.

**Tabell 5. Årlig värmeförbrukning utifrån energikartläggning av normaldrift i hygieniseringssteget. Behandlingskapacitet 21 tusen ton per år.**

Värmeförbrukning	Scenario 1 (21'ton/år)
Värmeförbrukning per år 70gradC i 1h [kWh]	2 221 811
Kostnad för värme per år 70gradC 1h [kr]	1 666 358

Elförbrukningen i hygieniseringssteget står för ca 5 % av anläggningens totala elförbrukning. Då inkluderas omrörare i hygieniseringstankar samt pumpning av substrat in och ut från tankarna.

**Tabell 6. Årlig elförbrukning utifrån normaldrift i hygieniseringssteget under alla årets drift dagar.**

Elförbrukning	Scenario 1 (21'ton/år)
Förbrukad el per år [kWh]	63 261
Kostnad för el per år [kr]	47 446

Beräknad årsförbrukning utgår från uppskattningar om elförbrukning under normaldrift som multipliceras med antalet drift dagar per år.

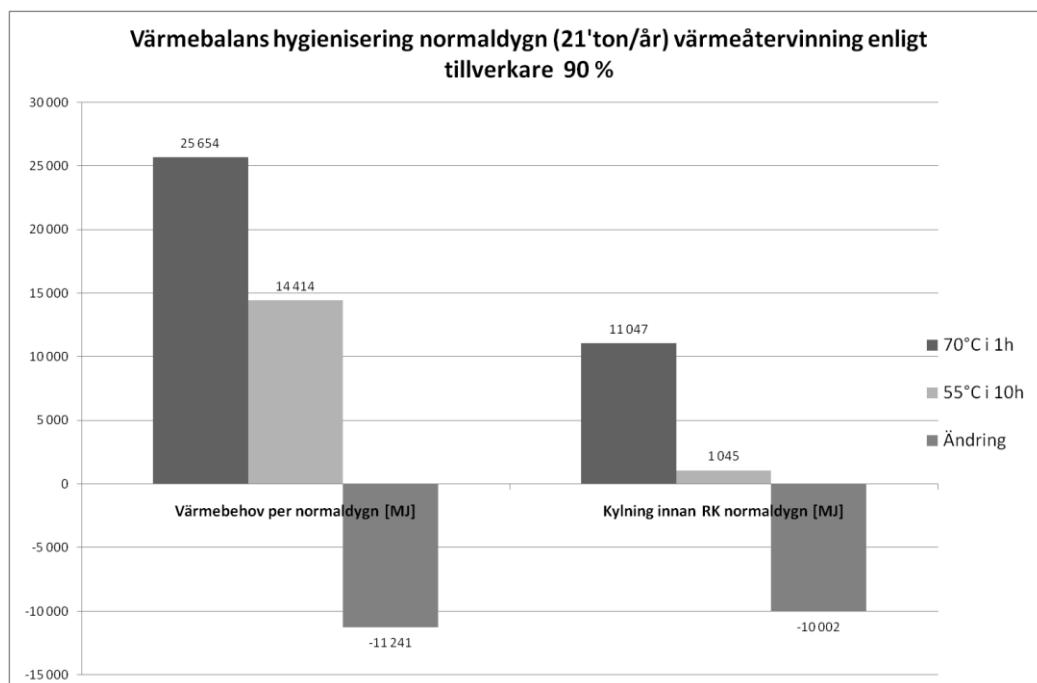
## 4.3 Utvärdering av alternativ hygieniseringsmetod

Energijämförelsen har visat att genom att byta hygieniseringsmetod från aktuell metod (70 °C i 1 timme) till lågtemperaturhygienisering (55 °C i 10 timmar) är det möjligt att minska värmebehovet. Beräkningar i den uppbyggda modellen visar också att den förväntade besparingen är starkt beroende av hur väl värmeåtervinningen efter hygieniseringen fungerar.

Utvärderingen av en ökad behandlingskapacitet har visat att en ökad behandlingskapacitet med bibehållen hygieniseringsmetod innebär en ökad energiförbrukning. En ökad behandlingskapacitet och byte från dagens hygieniseringsmetod till lågtemperaturhygienisering innebär däremot en liten energibesparing.

### 4.3.1 Förändrat värmebehov

I Figur 10 redovisas förväntad energibesparing under ett normaldygn om hygienisering vid 70 °C i 1h ersätts av hygienisering vid 55 °C i 10h. Behandlingskapaciteten är i båda fallen 21 tusen ton per år. Värmebehovet redovisas i de vänstra staplarna och kylbehovet (den största värmeförlustkällan) redovisas i högra delen av diagrammet. Ändringen av värmebehov samt kylbehov redovisas som en negativ stapel och motsvarar alltså energibesparingen man gör genom att byta hygieniseringsmetod.



**Figur 10** Förändrat värmebehov (till vänster) respektive kylbehov (till höger) redovisas som mellangrå stapel. Negativ stapel innebär alltså ett minskat värme och kylbehov. (RK = röt-kammare).

Jämförelsen visar att en värmebesparing på 44 % är att vänta vid ett byte från hygienisering i 70 °C under 1 timme till 55 °C i 10 timmar se Tabell 7 högst upp till höger. Drygt 90 % av värmen som tillförs



till i uppvärmningssteget vid hygienisering i 55 °C antas kunna återvinnas. Vid så hög värmeåtervinning förväntas mycket lite eller ingen kylning behövas. Antagandet om värmeåtervinning bygger på uppgifter om värmeväxlarnas kapacitet från Läckby Water (Karlsson pers. medd. 2011).

Värmeåtervinningen efter hygienisering i 70 °C har utifrån temperaturmätningar beräknats till 55 % när värmeväxlarna är rengjorda. Att värmeväxlarna har gjorts rena innan mätningen innebär att värmeväxlarnas prestanda är så hög som möjligt eftersom beläggningar har tvättats bort. Ändå klarar inte värmeväxlarna av att överföra all restvärme och förlusterna i kylkretsen är där betydligt större (se rad tre, kolumn tre i Tabell 7).

**Tabell 7 Översikt värmebehov, värmeåtervinningsgrad och kylning under normaldygn samt värmeledningsförluster i en normal sats under varierade processförhållanden.**

Värmebalans (aktuell behandlingskapac.)	70°C i 1h	55°C i 10h	Ändring	Proc.Ändring
Värmebehov per normaldygn [MJ]	25 654	14 414	-11 241	-44%
Värmeåtervinning	55%	91%		
Kylning innan RK normaldygn [MJ]	11 047	1 045	-10 002	-91%
Värmeledningsförluster per medel batch [MJ]	6,5	43,6	37	573%

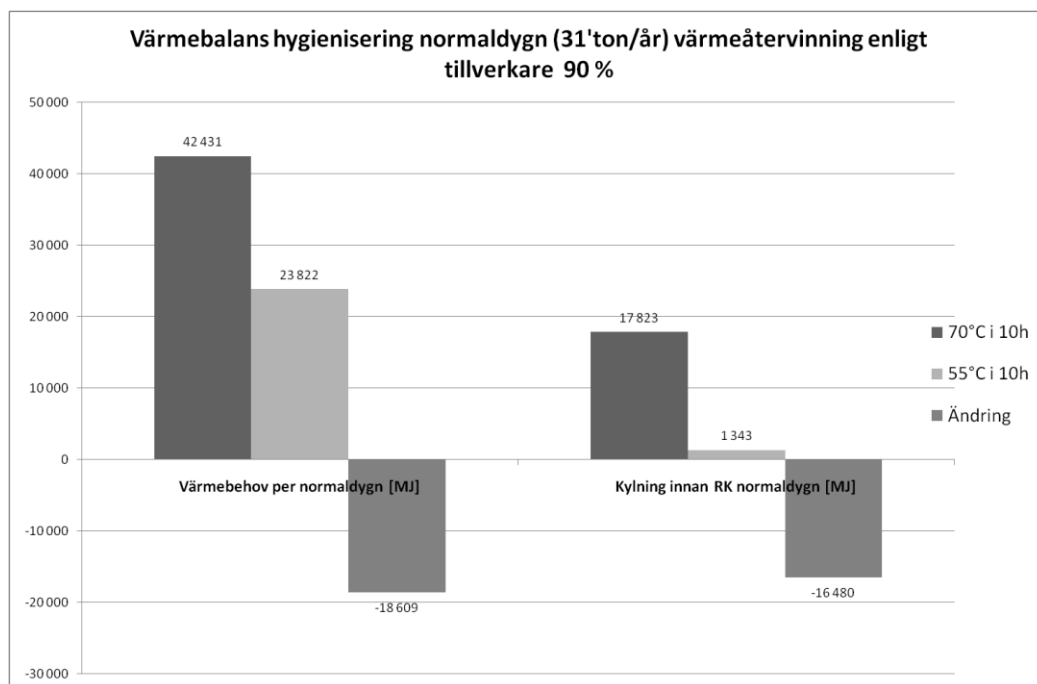
Genom att byta hygieniseringsmetod skulle behovet av att kyla substratet innan rötningen minska med 91 % eller 10 tusen MJ per normaldygn. I Tabell 7 går det att utläsa att ledningsförlusterna under lågtemperaturhygienisering är 37 MJ högre alltså nästan sex gånger så stora jämfört med nuvarande hygieniseringsmetod. Ändå görs en stor energibesparing genom att byta hygieniseringsmetod givet den aktuella värmeåtervinningsgraden.

**Tabell 8 Förändring i värmebehov vid ändrad hygieniseringsmetod och behandlingskapacitet på 21 tusen ton per år.**

Förändrat värmebehov (21' ton/år)	70gradC 1h	55gradC 10h	Ändring
Värmeförbrukning per år [kWh]	2 221 811	1 249 173	-972 639
Kostnad för värme per år [kr]	1 666 358	936 880	-729 479

Med angivet fjärrvärmepris görs en besparing på knappt 1 GWh per år vilket motsvarar 730 tusen kronor om året i minskade energikostnader. Elförbrukningen antas endast påverkas av ökad behandlingskapacitet och påverkas alltså inte av en ändrad hygieniseringstemperatur.

Nästa jämförelse innebär att den årliga behandlade mängden substrat per år ökar med 10 tusen ton till totalt 31 tusen ton per år. Här har antagits samma TS halt (7 %) som i *Scenario 1*. I praktiken kommer antagligen en högre TS-halt att eftersträvas. I Figur 11 nedan redovisas förväntad energibesparing under ett normaldygn vid byte från 70 °C i 1h till 55 °C i 10h och en behandlingskapacitet på 31 tusen ton per år. Återigen redovisas fjärrvärmebehov i staplarna till vänster och kylningsbehov i staplarna i högra delen av diagrammet. Förändringen är den negativa stapeln i slutet av varje grupp.



**Figur 11 Fjärrvärmebehov och kylbehov vid ändrad hygieniseringsmetod och ökad behandlingskapacitet.**

Även här är värmebesparingen 44 % vid byte av hygieniseringsmetod. Värmeåtervinningsgraden är densamma drygt 90 % för hygienisering vid 55 °C. De konduktiva förlusterna under en batch är desamma eftersom ingen ändring gjorts av tankarnas dimensioner eller prestanda. De konduktiva förlusterna förväntas vara 37 MJ högre nästan sex gånger större vid 55 °C i 10 timmar jämfört med hygienisering vid 70 °C i 1 timme.

**Tabell 9 Förändrade energiflöden vid ändrad hygieniseringsmetod och behandlingskapacitet på 31 tusen ton per år.**

Värmebalans (31'ton per år)	70°C i 10h	55°C i 10h	Ändring	Proc.Ändring
Värmebehov per normaldygn [MJ]	42 431	23 822	-18 609	-44%
Värmeåtervinning	55%	91%		
Kylning innan RK normaldygn [MJ]	17 823	1 343	-16 480	-92%
Värmeledningsförluster per medel batch [MJ]	6,5	43,6	37	573%

I procent görs samma värmebesparing. I absoluta tal är värmebesparingen vid byte av hygieniseringsmetod naturligtvis högre eftersom det är en större mängd substrat som behandlas. Värmebehovet förväntas minska med 18,6 tusen MJ per normaldygn och kylbehovet minskar med 16,5 tusen MJ per normaldygn.

**Tabell 10 Förändrat värmebehov och värmekostnader per år vid ändrad hygieniseringsmetod och ökad behandlingsmängd.**

Förändrat värmebehov (31' ton/år)	70gradC 1h	55gradC 10h	Ändring
Värmeförbrukning per år [kWh]	3 674 819	2 064 611	-1 610 207
Kostnad för värme per år [kr]	2 756 114	1 548 458	-1 207 656

På årsbasis förväntas fjärrvärmebehovet minska med 1,6 GWh/år vilket motsvarar en minskad utgift för värme på ungefär 1,2 miljoner kronor om året med aktuellt fjärrvärmepreis.

Jämförs nuvarande process och behandlingskapacitet på 21 tusen ton per år med en process där behandlingskapaciteten skulle ökas till 31 tusen ton per år går det att se att värmebehovet ökar enligt Tabell 11.

**Tabell 11 Förändrat fjärrvärmebehov vid ökad behandlingskapacitet.**

Värmeförbrukning	Scenario 1 (21'ton/år)	Scenario 2 (31'ton/år)	Scen2-Scen1	Procentuell förändring
Värmeförbrukning per år 70gradC i 1h [kWh]	2 221 811	3 674 819	1 453 008	65%
Kostnad för värme per år 70gradC 1h [kr]	1 666 358	2 756 114	1 089 756	65%
Värmeförbrukning per år 55gradC i 10h [kWh]	1 249 173	2 064 611	815 439	65%
Kostnad för värme per år 55gradC 10h [kr]	936 880	1 548 458	611 579	65%

Alltså, värmebehovet vid ökad behandlingskapacitet och nuvarande hygieniseringsmetod skulle öka med 1450 MWh per år vilket motsvarar en kostnadsökning på lite drygt 1 miljon kronor per år. Värmebehovet då både behandlingskapaciteten ökas och hygieniseringsmetoden byts, skulle däremot minska med knappt 160 MWh per år. Beräkningarna utgår från att alla driftdagar under året är normaldagar.

En ökad behandlingskapacitet med knappt 48 % leder till en ökning av värmebehovet med 65 %. Under förutsättning att nuvarande behandlingskapacitet behålls och processen inte optimeras för en ökad behandlingskapacitet. Beslutar anläggningen att byta behandlingsmetod till lågtemperaturhygienisering i samband med en 48 % ökning av behandlingskapaciteten så minskar man istället värmeförbrukningen med ca 7 %.

### 4.3.2 Förändrad elförbrukning

Vid jämförelse av den nuvarande behandlingskapaciteten och den högre behandlingskapaciteten så ökar elförbrukningen med ungefär 65 %. Det är ökad pumpning och omrörning som bidrar till den ökade elförbrukningen.

**Tabell 12 Förändrad energiförbrukning och energikostnader vid ändrad behandlingskapacitet.**

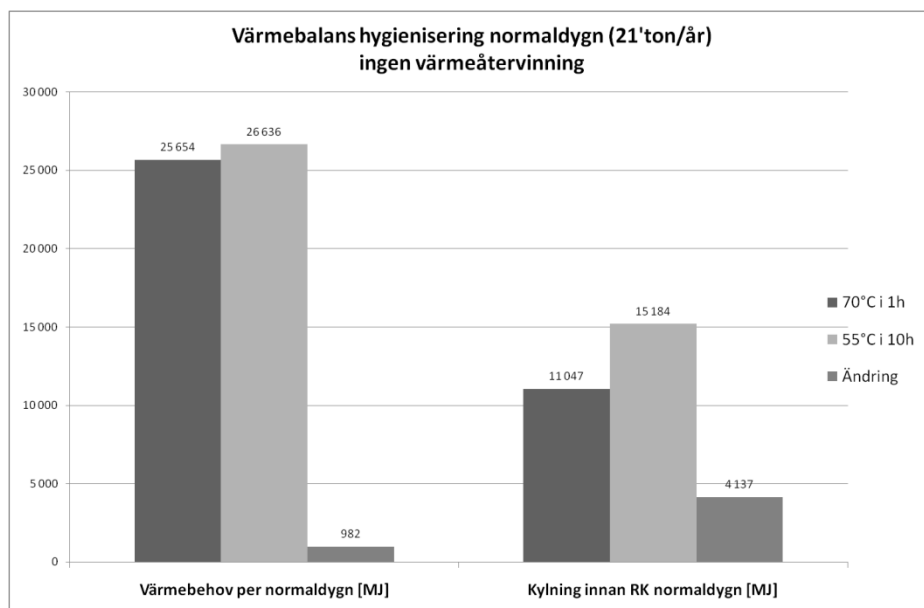
Elförbrukning	Scenario 1 (21'ton/år)	Scenario 2 (31'ton/år)	Scen2-Scen1	Procentuell förändring
Förbrukad el per år [kWh]	63 261	104 702	41 441	65,5%
Kostnad för el per år [kr]	47 446	78 527	31 081	65,5%

En ökning av behandlingskapaciteten med cirka 48 % ger en ökning av energibehovet på 66 %. Detta under förutsättning att systemet inte anpassats optimalt till en ökad belastning. Bland annat hålls dimensioner på hygieniseringstankarna och omrörare intakta och samma TS-halt (7 %) behålls.

### 4.3.3 Värmeväxlare och värmeåtervinningsgrad

Det har framkommit att värmeåtervinningsgraden kan variera kraftigt mellan teori och praktik. Vid kontakt med ett par anläggningar som har termofil rötning (rötkammartemperatur på ca 55 °C) har det framkommit att värmeåtervinning efter rötkammaren är svårt. På Uppsalas anläggning har i princip ingen värmeåtervinning varit möjlig alls trots att värmeväxlare installerats (Andersson 2010). Problemen består i att rören sätter igen eller att kraftig beläggning bildas när rötat slam skall passera genom värmeväxlaren. Nedan i Figur 12 redovisas därför förväntat fjärrvärmebehov vid olika värmeåtervinningsgrad. Det bör poängteras att det på Svensk Växtkraft inte är fråga om att värmeväxla rötat slam utan råslam alltså icke rötat substrat. Fysikaliska egenskaper som viskositet kan skilja sig åt mellan rötat slam och så kallat råslam. Det behöver därför inte vara felaktigt att anta en hög värmeåtervinningsgrad men det är mycket möjligt att värmeåtervinningsgraden är mycket lägre än vad som teoretiskt angivits från leverantören.

Först redovisas fallet då **ingen** värmeåtervinning tros vara möjlig.



**Figur 12** Fjärrvärmebehov och kylningsbehov när värmeåtervinningen tas bort.

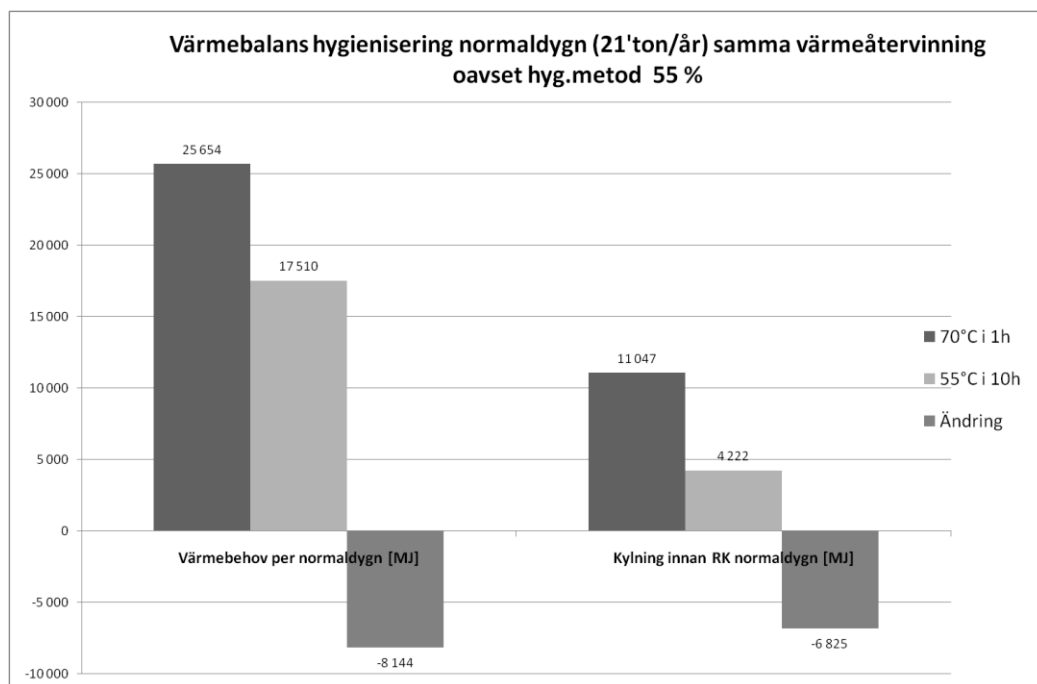
Värmebehovet i hygieniseringssteget redovisas i stapelgruppen till vänster medan kylbehovet redovisas i stapelgruppen till höger i figur 12. Värmebehovet förväntas öka något vid byte av hygieniseringsmetod till 55 °C i 10 timmar. Kylningsbehovet innan rötkammaren ökar betydligt eftersom värmen efter hygieniseringssteget alltså inte kan återvinnas i värmeåtervinningskretsen.

**Tabell 13** Energiflöden vid ändrad hygieniseringsmetod och utan värmeåtervinning.

Värmebalans (ingen värmeåtervinning)	70°C i 1h	55°C i 10h	Ändring	Proc.Ändring
Värmebehov per normaldygn [MJ]	25 654	26 636	982	4%
Värmeåtervinning	55%	0%		
Kylning innan RK normaldygn [MJ]	11 047	15 184	4 137	37%
Värmeledningsförluster per medel batch [MJ]	6,5	43,6	37	573%

Istället för att minska ökar alltså fjärrvärmebehovet med 4 % och kylningsbehovet med 37 % när värmeåtervinningsgraden är noll. Det finns samtidigt anledning att tro att värmebehovet är överskattat för den alternativa hygieniseringsmetoden (se beskrivning under kapitel 3.3.4.).

I Figur 13 redovisas hur fjärrvärmebehovet förväntas förändras om värmeåtervinningen är lika stor i aktuell hygienisering och lågtemperaturhygienisering. Det vill säga värmeåtervinningen är 55 % även när hygieniseringsmetoden ändras till 55 °C i 10 timmar.



**Figur 13 Värmebehov ändrad hygieniseringsmetod och samma värmeåtervinning oavsett metod.**

Resultatet visar att fjärrvärmebehovet kommer att minska med 32 % och kylningsbehovet minskar med 62 % (Tabell 14).

**Tabell 14 Energiflöden när värmeåtervinningen är densamma (55 %) oavsett hygieniseringsmetod.**

Värmebalans (samma återvinningsgrad)	70°C i 1h	55°C i 10h	Ändring	Proc.Ändring
Värmebehov per normaldygn [MJ]	25 654	17 510	-8 144	-32%
Värmeåtervinning	55%	55%		
Kylning innan RK normaldygn [MJ]	11 047	4 222	-6 825	-62%
Värmeledningsförluster per medel batch [MJ]	6,5	43,6	37	573%

Värmebalansen när värmeåtervinningsgraden antas vara 90 % redovisas i Figur 11 och i Tabell 9 på sidan 30. Med en så hög återvinningsgrad minskar värmeförbrukningen med 44 % och kylningsbehovet minskar med 91 %.

I Tabell 15 nedan redovisas en översikt av den årliga förväntade värmeförbrukningen med olika värmeåtervinningsgrad.

**Tabell 15 Värmebehov och värmekostnader för lågtemperaturhygienisering vid olika värmeåtervinningsgrad (v.åter = återvinningsgrad).**

Förändrat värmebehov Scenario 1	70gradC 1h	55°C i 10h (v.åter 0 %)	55°C i 10h (v.åter 55 %)	55°C i 10h (v.åter 90 %)
Värmeförbrukning per år [kWh]	2 221 811	2 308 454	1 517 512	1 249 173
Kostnad för värme per år [kr]	1 666 358	1 731 341	1 138 134	936 880

Vid jämförelse på årsbasis av de tre fallen av värmeåtervinningsgrad (Tabell 15) framgår det att värmebehovet är ganska lika när värmeåtervinningen är drygt 90 % och när den är 55 %. Det vill säga energivinsten är nästan lika stor även om återvinningsgraden skulle vara betydligt lägre än vad

leverantören anger. Högst värmebehov är det när värmeåtervinningen är 0 %. Då leder ett byte av hygieniseringsmetod från 70 °C i 1h till 55 °C i 10 timmar inte längre till någon energibesparing.

## 5 Diskussion

### 5.1 Andra anläggningars energiförbrukning

Vid jämförelse av energiförbrukningen ser det ut som att Svensk Växtkraft förbrukar mer energi än andra centrala samrötningsanläggningar. Enligt rapporten *Energianalys av biogassystem (2003)* förbrukar en central samrötningsanläggning med mesofil rötning mellan 70 – 120 MJ<sub>värme</sub>/ton substratblandning och 50 – 80 MJ<sub>el</sub>/ton substratblandning. Undersökningen anger energiförbrukningen som primärenergi med primärenergifaktor 1,3 MJ för värme och 2,2 MJ för el (Berglund och Börjesson 2003, 4 och 9). Motsvarande specifika energiförbrukningen på Svensk Växtkrafts anläggning är för en normaldag 139 MJ<sub>värme</sub>/ton substratblandning och 136 MJ<sub>el</sub>/ton substratblandning (primärenergi med samma primärenergifaktor som tidigare angivits). El till kontorslokaler och mindre komponenter har uteslutits. Värme förbrukas på Svensk Växtkrafts anläggning i princip bara i hygieniseringen varför uppvärmning av lokaler inte inkluderas. Andra anläggningar förbrukar dessutom mycket värme i rötkammaren. Svensk Växtkrafts rötkammare varmhålls med spillvärme från gasomröraren (i princip elvärme). Detta kan bidra till att elförbrukningen är hög. Andra anläggningar som har mekanisk omrörning tillför istället värme via fjärrvärme eller förbränning av biogas eller biobränsle vilket leder till en lägre elförbrukning. Det är svårare att direkt se en anledning till varför värmeförbrukningen är jämförelsevis hög. Substratets sammansättning påverkar både el- och värmeförbrukningen. Det är relevant att nämna att Berglund och Börjesson i sin rapport utgår från en torrsustanshalt på 10 % medan Svensk Växtkrafts anläggning ligger på en TS-halt runt 7 %. En lägre TS-halt förväntas generellt ge lägre elenergiförbrukning i processtegen efter spädning (Berglund & Börjesson 2003) och borde teoretiskt ge ett högre värmebehov (se formel 5).

Ett annat mått som är ett bättre mått på energieffektivitet av metangasproduktionen är ”energiförbrukning som procent av energiinnehåll i producerad biogas”. Enligt energianalysen förbrukar en central samrötningsanläggning med mesofil rötning mellan 6-17 % värme av producerad biogas och 8-17,5 % el av producerad biogas (Berglund och Börjesson 2003). Svensk växtkraft förbrukar 16,6 % värme av producerad biogas samt 19,4 % el av producerad biogas<sup>2</sup>. Här är istället värmeförbrukning inom spannet för energiförbrukningen jämfört med andra anläggningar. Elförbrukningen ligger fortfarande högre än spannet.

Ytterligare jämförelse kan göras med den energikartläggning som gjordes av Kungsängens biogasanläggning i Uppsala (Andersson 2011). Den anläggningen förbrukar 129 kWh<sub>värme</sub>/ton mottaget substrat (primärenergi) i hygieniseringssteget och totalt 119 kWh<sub>el</sub>/ton mottaget substrat (från elmätare) inklusive kontorsel (Andersson 2011, 46). Motsvarande värde för Svensk Växtkraft är 126 kWh<sub>värme</sub>/ton mottaget substrat i hygieniseringen och totalt 64 kWh<sub>el</sub>/ton mottaget substrat inklusive kontorsel. Värmen är angiven som primärenergi utifrån beräkningar medan elektriciteten är avläst från elmätare. Detta tyder istället på att värmeförbrukningen är jämförelsevis normal och att elenergiförbrukningen är mycket låg i Svensk Växtkrafts anläggning. Utifrån denna jämförelse ser det ut som att Svensk Växtkrafts anläggning förbrukar jämförelsevis lite energi. Det är samtidigt svårt att förklara varför Uppsalas biogasanläggning inte utmärker sig i Berglund och Börjessons energianalys

---

<sup>2</sup> Här har samma primärenergifaktor använts som tidigare stycke. Det betyder att angivet värde för specifik energiförbrukning uttryckt som procent av producerad biogas i resultatdelen har multiplicerats med respektive primärenergifaktor.

från 2003 trots att anläggningen ingick i den utredningen. Möjligen kan man ifrågasätta om resultatet från Berglund och Börjesson 2003 fortfarande är relevant. Biogasanläggningen i Uppsala har byggts om och utökat förbehandlingen sedan 2003 och det kan även finnas andra anläggningar som genomgått liknande förändringar. Det är samtidigt oklart om Uppsalas biogasanläggning är en god måttstock för energiförbrukning eftersom deras arbete med energieffektivisering bara börjat.

Det är vanskligt att dra allt för långtgående slutsatser av jämförelserna ovan. Eftersom det inte finns någon standard för hur energikartläggningar ska genomföras inom biogassektorn så är resultatet av olika arbeten svåra att jämföra. Resultaten kan som i denna undersökning bygga på uppskattade värden för normaldag med normaldrift. Andra resultatet kan ha beräknats utifrån kontinuerliga mätningar under en längre tidsperiod. På Svensk Växtkraft är den beräknade värmeförbrukningen i hygieniseringen 126 kWh/ton substrat utifrån temperatur och flödesdata som gällde den 1-2 mars 2011. Om data istället används från fjärrvärmemätaren mellan den 18-19 maj 2011 så är förbrukningen 123 kWh/ton substrat. Mätningar under en och samma årstid varierar antagligen mindre än om man genomför mätningar under både den kalla och varma delen av året. Skillnader i värmeförbrukning mellan kalla och varma årstider kan vara betydande men tas inte alltid med i beräkningarna. På Svensk Växtkraft står hygieniseringstankarna inomhus och bör inte i lika stor utsträckning påverkas av variationer i utomhustemperaturen.

Resultatet av energikartläggningen på Svensk Växtkraft får ses som en inledning till ett långsiktigt arbete för att energieffektivisera processen. Energikartläggningen ger en inblick i vilka delar av anläggningen som skulle kunna vara intressanta att undersöka vidare. Resultatet är också ett underlag för att kunna avgöra var fler mätningar behöver göras för att få ett ännu mer detaljerat resultat inför fortsatt arbete.

## 5.2 Värmeförluster och mätfel i hygieniseringssteget

Under energikartläggningen av hygieniseringssteget så gjordes flera upptäckter men det är främst tre av dessa som behöver diskuteras vidare. Det är dels de stora obestämda energiförlusterna som uppmättes i hygieniseringstankarna under hygieniseringen. Ledningsförluster genom tankens skal utgör bara en mindre del av de totala förlusterna under hygieniseringen. Resterande förluster (utgör ofta mer än 50 %) tros häröra från ångbildning som förloras via ventilationsluften men andra orsaker kan inte uteslutas. Att en del källor till värmeförluster inte kunnat fastställas påverkar möjligheterna att modellera vilka de totala värmeförlusterna är vid lågtemperaturhygienisering. Detta påverkar i sin tur möjligheterna att beräkna den totala faktiska energiförbrukningen i lågtemperaturhygienisering. Samtidigt är det möjligt att ventilationen utformas på ett helt annat sätt i en alternativ hygienisering exempelvis med gasuppsamling eller ett blockerande spjäll i ventilationen. Förlusterna genom ventilationen kan därför anses starkare kopplade till teknisk utformning av ventilationen än till hygieniseringsmetod. Konduktion genom tankens väggar kommer däremot att vara direkt kopplade till hygieniseringstanken och hygieniseringstemperaturen i båda metoderna. Att endast jämföra ledningsförluster är därför relevant för att avgöra om det är meningsfullt att gå vidare och göra en mer exakt energikalkyl av lågtemperaturhygienisering. Vid en sådan djupare studie kan det istället vara aktuellt att utreda ventilationsförlusterna vidare. De största andelarna av värmetransporter i hygieniseringssteget sker i kylkretsen och värmeåtervinningskretsen (tillsammans ca 90 %) varför dessa måste anses som viktigast att modellera initialt.

När uppvärmningsbehovet i hygieniseringssteget skulle beräknas jämfördes resultatet med den effektmätare (P) som finns installerad i uppvärmningskretsen (Figur 1). Den visade en ca 20 % lägre tillförd värmemängd än väntat. Efter samtal med driftpersonal konstaterades att mätaren antagligen angav fel värde på grund av en felmontering. Detta påverkar naturligtvis möjligheterna att värdera resultatet från modellen. Det öppnar även upp för frågan om fler mätfel förekommer i anläggningen. Om målet hade varit att väldigt exakt bestämma den totala energiförbrukningen så skulle detta

naturligtvis varit viktigt att undersöka vidare. Målet med den här undersökningen var främst att jämföra två hygieniseringsmetoder vilket ledde till att ingen vidare undersökning ansågs nödvändig. Beräkningarna i respektive scenario bygger på samma indata (av temperaturer och flöden) vilket medför att eventuella mätfel bör påverka varje resultat lika mycket och därmed inte påverka jämförelsen avsevärt.

Den tredje upptäckten som gjordes handlar om värmeförlusterna i rörledningen in till och ut från hygieniseringstankarna. Det har visat sig att förlusterna i rörledningen in till respektive ut från hygieniseringstankarna ofta är större än totala förlusterna i tankarna under hygieniseringen. Upptäckten är viktig i energikartläggningen och att isolera rören kan vara en betydande energibesparande åtgärd. På grund av att upptäckten gjordes sent och att mycket tid i projektet redan förbrukats till andra områden så inkluderades inte denna förlustkälla i energijämförelsen av hygieniseringsmetoder. En relevant frågeställning som väcks här är vilka energibesparande åtgärder som är kostnadseffektivast? Hur stor är energibesparingen när man byter hygieniseringsmetod och hur stor är den om man isolerar rörledningen? Hur skiljer sig investeringskostnaderna och hur stora är effekterna av olika energibesparingsåtgärder? Detta är aspekter som bör tas med om man väljer att gå vidare med undersökningen av att byta hygieniseringsmetod.

### 5.3 Värmeåtervinningsgrad och värmebesparing

Den värmeenergibesparing som görs genom att byta hygieniseringsmetod har visat sig vara starkt beroende av hur hög värmeåtervinningsgraden är. Återvinningsgraden kan variera mellan 90 % enligt leverantör och ned till 0 % enligt praktiska erfarenheter av värmeåtervinning efter röt-kammaren (Karlsson pers. medd. 2011), (Andersson 2011). I biogasproduktionen skiljer man på råslam som är substratblandning innan rötning och rötslam som är substratblandning efter rötningen. Det finns inget som idag entydigt stärker att värmeåtervinning med råslam skulle vara förknippat med samma svåra igensättningsproblem som rötslam. De praktiska negativa erfarenheterna av värmeåtervinning har rapporterats från värmeväxling med rötslam. Den uppgiften som lämnades av Karlsson (2011) baseras på en specifik förfrågan om värmeåtervinning med råslam på Svensk Växtkraft. Det har därför ansetts godtagbart att förutsätta att värmeåtervinningsgraden är så hög som 90 % om det samtidigt framhålls att värdet är teoretiskt.

Betydligt osäkrare är effekterna av att systemets dimensioner och prestanda inte har anpassats till lågtemperaturhygienisering. Den värmebesparing som har räknats fram här är en termodynamisk jämförelse förutsatt att systemet i hygieniseringssteget behålls intakt oavsett hygieniseringsmetod. I ett verkligt scenario är det rimligare att förmoda att hygieniseringstankarna skulle vara av betydligt större volym. Huruvida detta leder till större eller mindre ledningsförluster genom tankens skal beror även på vilken isoleringstjocklek som bekostas tanken samt om tanken placeras direkt på marken eller upphöjd på ben. Omrörningen kommer tveklöst att behöva ändras och anpassas till de större tankarna för att säkerställa att ingen temperaturgradient bildas i substratet.

Ett byte av hygieniseringsmetod skulle inte längre innebära att det är självklart att hygieniseringen sker i separat tank innan röt-kammaren. Det kan till exempel finnas fördelar med värmeväxlingen om hygienisering sker efter röt-kammaren. Detta skulle emellertid innebära att ingen säkerhetsbarriär finns innan röt-kammaren. Det vill säga de processtörningar som uppstår då oönskade material tränger igenom förbehandlingen drabbar den känsliga röt-kammaren direkt istället för att fångas upp i hygieniseringen. En lägre hygieniseringstemperatur innebär också att man kan förvänta sig att biogas bildas i hygieniseringen. Uppsamling av den biogasen måste inkluderas i systemutformningen. Mer lukt kommer att antagligen också att genereras vid denna lägre hygieniseringstemperatur vilket innebär ytterligare behandling av ventilationsluften.



Resultatet i den här rapporten visar på att det finns anledning att gå vidare med en utredning av vilken processutformning som är optimal vid byte av hygieniseringsmetod samt vilken inverkan en optimal utformning kommer ha på energiförbrukningen. Den modell som har byggts upp här är ett användbart verktyg för dessa undersökningar.

## 5.4 Val av modell

Tonvikten i detta arbete har legat på energijämförelsen av aktuell hygienisering och lågtemperaturhygienisering. Energijämförelsen och dess resultat beror till stor del på uppbyggnaden av modellen för energiberäkningarna. Den metod som har valts för att bygga upp modellen baseras helt på termodynamiska samband för de kända värmeförlusterna. Modellen blir på så sätt mer som ett termodynamiskt beräkningsprogram som lätt kan anpassas till ändrade förhållanden så som ändrade dimensioner eller prestanda på tankarna. Ett alternativt förfarande skulle kunna ha varit att istället bygga upp en modell som fungerade mer som en "black box". Det vill säga utifrån viss kunskap om och erfarenhet av hur systemet beter sig anpassa modellens egenskaper till den mätdata som finns från systemet. Nackdelen med en sådan identifieringsprincip är att modellen blir specifikt anpassad till just det system som man studerar. Fördelen med den fysikaliska modell som byggts upp här är att dimensioner på tankar, isolering och liknande kan varieras vilket gör den användbar även när man går vidare och utreder fler aspekter av lågtemperaturhygienisering.

## 5.5 Energipriser

Samtliga beräkningar av energikostnader utgår från ett elpris på 0,75 kr/kWh och ett värmepris på 0,75 kr/kWh. Det huvudsakliga syftet med studien har inte varit att fastslå de ekonomiska effekterna av att byta hygieniseringsmetod. Det anses ändå värdefullt att uppskatta energiförbrukningen i monetära termer varför detta tagits med som ett delmål. Att anta fasta energipriser är dock en förenkling av verkligheten. Energipriser varierar över tid och trenden för fjärrvärmepriset är att det stiger (Trad 2010). Detsamma gäller elpriset (pers. medd. Leksell 2011). När energibesparande åtgärder ska värderas ekonomiskt över tid är det viktigt att noggrant analysera energipriser och dess utveckling. Eftersom denna studie inte har haft någon tidsaspekt av den ekonomiska värderingen har en sådan analys inte varit aktuell. Däremot bör inte resultatet användas okritiskt för uppskattningar av återbetalningstid eller andra liknande ekonomiska värderingar med ett längre tidsperspektiv.

# 6 Slutsats och förslag på vidare studier

Val av metod och systemavgränsningar har en stor inverkan på resultatet av en energikartläggning och även på energijämförelsen. Det är viktigt att beakta dessa aspekter när man värderar resultatet och jämför energiförbrukningen med andra anläggningars energiförbrukning.

Det finns anledning att tro att det går att minska energiförbrukningen på Svensk Växtkrafts anläggning. Ett viktigt steg är därför att utvärdera energieffektiviserande åtgärder vidare och göra en utförligare ekonomisk värdering för att kunna prioritera vilka åtgärder som skall genomföras först.

## 6.1 Elförbrukning

Resultatet av energikartläggningen tyder på att gasomrörningen är den komponent som enskilt står för den största elförbrukningen i processen (23 %). Därför bör en undersökning göras av hur energiförbrukningen för omrörning kan minska genom att ersätta eller komplettera gasomrörningen

med mekanisk omrörning. Överskotsvärmen från gasomrörningen är idag den enda varmhållningen i rötkammaren. Därför bör även en alternativ varmhållning i rötkammaren undersökas.

Det har framkommit att vissa utrymmen på biogasanläggningen periodvis värms med direktverkande el. Mindre komponenter och kontorsel står tillsammans för 18 % av elenergiförbrukningen på anläggningen. En separat energikartläggning för att undersöka denna förbrukning skulle därför vara intressant. Flera små och kostnadseffektiva energibesparande åtgärder kan tillsammans bli en betydande total energibesparing.

För att uppnå en mer detaljerad och exakt kartläggning av elenergiförbrukningen bör möjligheterna att installera effektmätare och logga drifttiden undersöks. En positiv sidoeffekt av en sådan mätning är att processövervakningen förbättras.

## 6.2 Värme i hygieniseringssteget

Den största källan till värmeförluster i dagens hygienisering är kylningen efter värmeåtervinningen (40 % av värmeförlusterna). En stor del av värmen förloras också i rören in till och ut från hygieniseringstankarna under fyllning och tömning av tankarna (6 % respektive 2 % av värmeförlusterna). Den värmemängd som förloras i rörledningen är större än den totala värmeförlusten i hygieniseringstankarna under hygieniseringen. Värmeenergibesparingen av att isolera rören bör därför utredas.

Konduktionsförlusterna genom hygieniseringstankarnas hölje utgör oftast mindre än 50 % av totala förlusterna under hygieniseringen med nuvarande hygieniseringsmetod. Fortsatta mätningar behöver göras för att fastställa orsaken till de största förlusterna under hygieniseringen.

## 6.3 Lågtemperaturhygienisering

De totala konduktionsförlusterna under själva hygieniseringen blir knappt sex gånger högre om man byter från dagens hygieniseringsmetod till lågtemperaturhygienisering. Totalt så förväntas ändå värmeförbrukningen minska med 44 % förutsatt att värmeåtervinningsgraden är 90 % som leverantören av värmeväxlare uppger. Det kan finnas anledning att räkna med att värmeåtervinningsgraden är lägre.

Det anses finnas goda skäl att fortsätta utreda lågtemperaturhygienisering vidare.

## 6.4 Ökad behandlingskapacitet

Vid ökad behandlingskapacitet från dagens 21 tusen till 31 tusen ton per år (48 % ökning) kommer värmeförbrukningen att öka med 1450 MWh (65 %) per år. Om man ökar behandlingskapaciteten till 31 tusen ton per år och samtidigt byter hygieniseringsmetod från dagens metod till lågtemperaturhygienisering minskar värmeförbrukningen med 160 MWh (ca 7 %) per år.

# Referenser

Abel, Enno., Elmroth, Arne. (2006). Byggnaden som system. ISBN 91-540-5974-1. Forskningsrådet Formas.

Alvarez, Henrik. (2006). Energiteknik. Tredje upplagan, ISBN 91-44-04509-3. Lund. Studentlitteratur.

Andersson, Mats. (2011). Energikartläggning vid biogasanläggningen, Kungsängens gård. Uppsala. Sveriges Lantbruksuniversitet.

Berglund, Maria., Börjesson, Pål. (2003). Energianalys av biogassystem. Rapport nr 44. Lund. Institutionen för teknik och samhälle, Lunds tekniska högskola.

Biogasportalen. (2011). Biogasens historia.

<http://www.biogasportalen.se/FranRavaraTillAnvandning/VadArBiogas/Biogasenshistoria.aspx>  
(Hämtad: 2011-06-13)

Carlsson, My., Uldal, Maritna. (2009). Substrathandbok för biogasproduktion. SGC 200. Svenskt Gastekniskt Center, SGC.

Edström, Mats., Nordberg, Åke. (2004). Producera biogas på gården - gödsel, avfall och energigrödor blir värme och el. JTI nr 107. Uppsala. JTI - Institutionen för jordbruks- och miljöteknik.

Ekroth, Ingvar., Granryd, Eric. (1994). Tillämpad termodynamik. ISBN 91-7170-067-6. Stockholm. Inst. för Energiteknik, Avd. för Tillämpad termodynamik och kylteknik. Kungliga Tekniska Högskolan KTH.

Energimyndigheten. (2011). Vägledning för energikartläggning, energieffektivisering i små och medelstora företag.

[http://www.energimyndigheten.se/Global/Foretag/Energikartlaggningscheckar/Handbok%20Elin\\_kort%20ver%2003ny.pdf](http://www.energimyndigheten.se/Global/Foretag/Energikartlaggningscheckar/Handbok%20Elin_kort%20ver%2003ny.pdf) (Hämtad: 2011-04-10).

Jarvis, Åsa., Schnürer, Anna. (2009). Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar. SGC207. Malmö. Svenskt Gastekniskt Center SGC.

Jonsson, Fredrik; drifttekniker på Kalmar Biogas AB (2011), telefon 2011-04-27.

Jonsson, Kristina. (2005). Optimering av isolering på ackumulatortank. Umeå. Umeå universitet, Tillämpad fysik och elektronik.

Karlsson, Lars-Evert; försäljningschef Purac Puregas, Läckaby Water AB (2011). E-mail 2011-04-26

Leksell, Niklas; driftchef Svensk Växtkraft AB (2011). Muntligt 2011-06-17

Ljung, Lennart., Glad, Torkel. (2004). Modellbygge och simulering. Upplaga 2:4. Lund. Studentlitteratur.

Magnusson, Ann-Sofie. (2006). Elenergieffektivisering vid Käppalaverket. Stockholm. Institutionen för kemiteknik, Kungliga Tekniska Högskolan KTH.

Mossberg, Elin. (2007). Energieffektivisering av Duvbackens reningsverk. Stockholm. Institutionen för kemiteknik, Kungliga Tekniska Högskolan KTH.

Nordling, Carl., Österman, Jonny. (2006). Physics handbook for Science and Engineering. Eight edition. Lund. Studentlitteratur.

Norin, Erik. (2007). Alternativa hygieniseringsmetoder. Rapport SGC 179. Svenskt Gastekniskt Center SGC.

RVF Utveckling. (2005). Utvärdering av storskaliga system för kompostering och rötning av källsorterat bioavfall. Bilaga 1. Rapport 2005:06. RVF Service AB.

Svahn, Johan. (2006). Energioptimering av biogasproduktion Hur primärenergibehov till biogasanläggning kan minskas med energiåtervinning och isolering. Umeå. Umeå universitets tekniska högskola.

Svenskt Vatten. (2011). Energiprojektet. Svenskt Vattens hemsida.  
<http://www.svensktvatten.se/FoU/Energiprojektet/> (Hämtad: 2010-05-10)

Svensk Växtkraft. (2010). Svensk Växtkraft Biogas Company Västerås.

Svärd, Åsa. La Cour Jansen, Jes. (2003). Svenska biogasanläggningar– erfarenhetssammanställning och rapporteringssystem. Rapport VA-Forsk 2003-14. Stockholm. Svenskt Vatten AB.

Trad, Sonya. (2010). Fjärrvärmepriser 2010. Externt PM. Svensk Fjärrvärme AB.

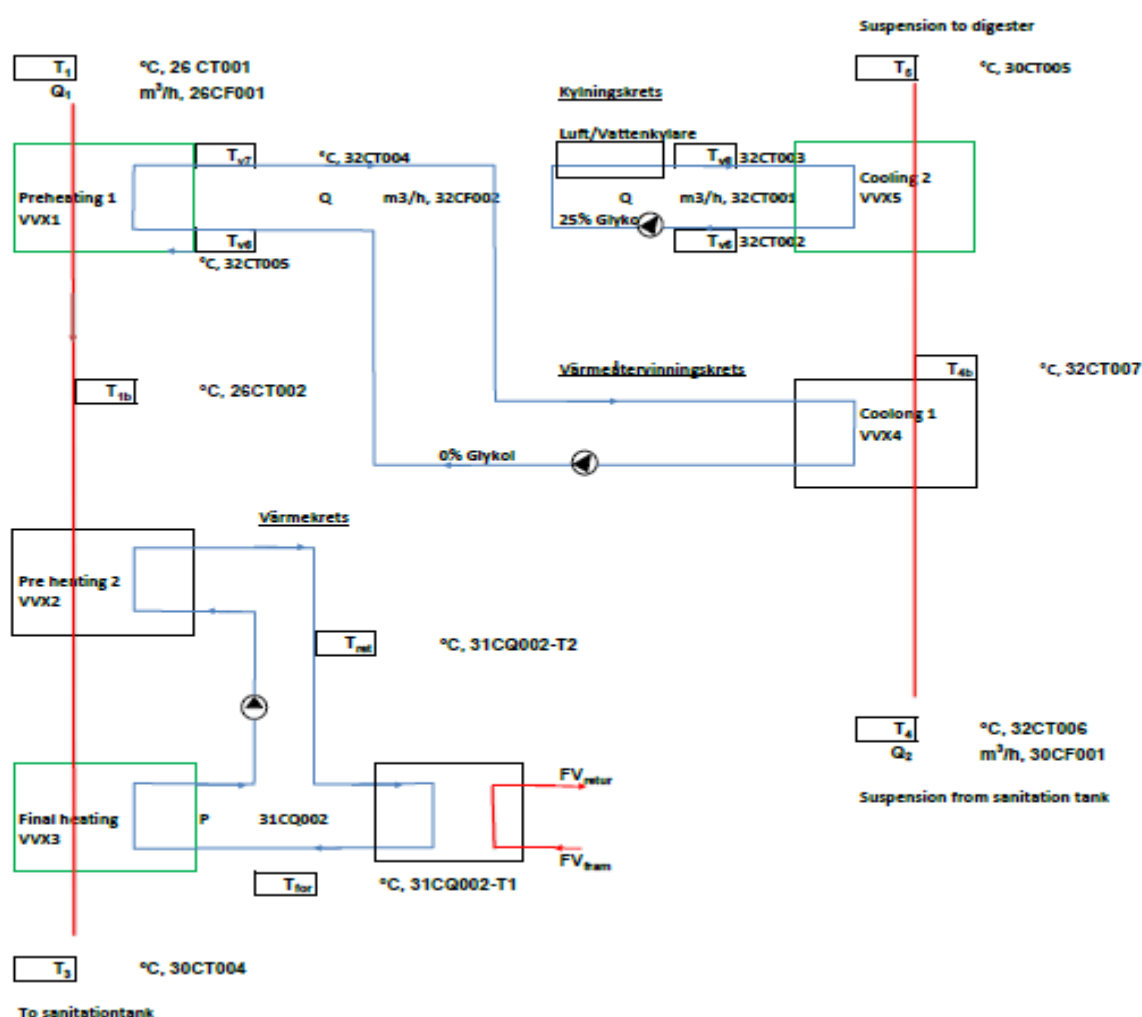
Çengel, Yunus A. (2006). Heat and mass transfer - a practical approach. Third edition. Singapore. McGraw-Hill.

The Engineering Toolbox. Thermal Conductivity of some common Materials and Gases.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html) (Hämtad: 2010-04-09)

# Appendix 1

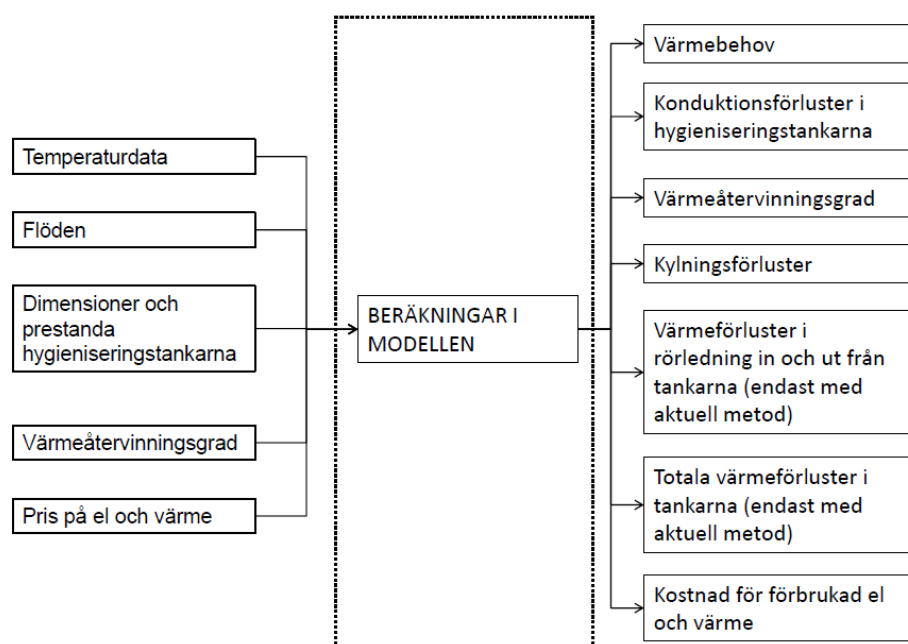
## Beskrivning av termodynamisk modell över hygieniseringssteget på Svensk Växtkrafts biogasanläggning

Det system som har studerats är hygieniseringen från det att substratet kommer in till förvärmningen (högst upp till vänster i processchemat nedan) fram till rötkammaren efter kylningssteget (längst upp till höger i processchemat). Boxar med T betyder att temperaturen mäts i den punkten medan Q står för flödesmätare. Själva hygieniseringstankarna studerades också men har utelämnats från bilden. De ligger mellan värmeväxlare VVX3 och värmeväxlare VVX4 och är tre stycken parallellkopplade tankar om vardera 16 m<sup>3</sup>.



prestanda har tagits från ritningar. Värmeåtervinningsgraden kan antingen anges eller beräknas utifrån temperaturdata före och efter återvinningskretsen. Elpris och värmepriser måste anges för att kostnader ska kunna beräknas.

De uppgifter som beräknas och kan levereras som utdata från modellen listas till höger i figuren nedan. Värmeförluster i rörledningen in till och ut från tankarna under fyllning och tömning förutsätter att kontinuerlig temperaturdata loggas både efter uppvärmningen (V VX3) och i tankarna. Även beräkningar av totala förluster under hygieniseringen kräver att temperaturen mäts i tankarna. Modellen kan bara uppskatta ledningsförluster utifrån angiven temperatur inne i (hygieniseringstemperaturen) och utanför tanken (temperatur i processhallen). Inga temperaturer simuleras fram. Temperaturer sätts antingen som ett användarbestämt värde eller finns tillgängliga i form av uppmätta temperaturdata och läses in från ett Excel-dokument.



#### Kronologisk beskrivning av beräkningar i modellen

1. Temperatur- och flödesdata läses in i Matlab från Excel enligt ett användarangivet intervall. Här har minutvärden lästs in under ett dygn i exekveringsfilen *lasdata.m*.
2. Vissa konstanter definieras. Önskad torrsubstanshalt i substratblandningen efter dispergering, ökning av behandlingskapacitet, pris på el och pris på värme definieras.
  - 2.1. Om behandlingskapaciteten ökas så beräknas det ökade volymflödet genom processen med hjälp av TS-halten i en separat exekveringsfil (*volfl.m*). Det ökade volymflödet adderar till det ursprungliga volymflöde som hämtats från ett Excel-dokument.
3. Uppvärmningsbehovet beräknas i en funktion (*Qvrm*) utifrån temperaturdata före och efter uppvärmningssteget, volymflöde och torrsubstanshalt hos substratet.
4. Därefter beräknas förlusterna mellan uppvärmningssteget i värmeväxlare V VX3 och värmeåtervinnningen i värmeväxlare V VX4. Beräkningarna utförs i en separat exekveringsfil (*hygloss*) eller direkt i scenariofilen. I beräkningarna beaktas i första hand ledningsförluster i tankarna. Om temperaturdata finns tillgänglig beräknas förlusterna i rörledningen in till och ut från tankarna samt totala värmeförluster i tankarna under hygieniseringen. Den temperaturdata som krävs är uppmätt temperatur i tankarna och temperatur efter uppvärmningskretsen.

- 4.1. Det är här modellen av själva hygieniseringstankarna, deras dimensioner och prestanda definieras. Beräkningarna av ledningsförluster genom tankens hölje beräknas i en funktion (*Qcond*) som tar hygieniseringstemperatur och tankens ytemperatur som inparametrar. Om temperaturdata saknas beräknas ledningsförlusterna i en annan funktion (*Qcons*) som tar angiven temperatur efter uppvärmningskretsen, temperatur på tankens yta från grundscenariot, temperatur i processhallen och värmeledning genom tankens hölje från grundscenariot. En värmeövergångskoefficient tas fram utifrån ytemperaturdata och värmeledning genom tankens hölje i grundscenariot. Utifrån angiven hygieniseringstemperatur, temperatur i processhallen samt beräknad värmeövergångskoefficient beräknas värmeledningen för den alternativa hygieniseringsmetoden.
- 4.2. För grundscenariot där temperatur och flödesdata finns tillgänglig beräknas också värmeförluster i rörledning in till och ut från tankarna samt totala värmeförlusterna under en hygiensiering (*hygloss*).
5. Efter hygieniseringen återvinns värmen i substratet. Hur stor andel som återvinns kan antingen anges som en procentsats eller beräknas om temperaturer före och efter värmeåtervinningskretsen på kall och varm sida är kända.
6. Sista steget innan rötkammaren är kylningen. Kylningsbehovet beräknas (*Qvrm*) genom att temperaturen efter värmeåtervinningen är känd samt att rötkammartemperaturen (alltså temperaturen efter kylningen) är känd. Temperaturen i rötkammaren kan antingen anges av användaren eller läsas in från temperaturdata i Excel-dokumentet.
7. Slutligen summeras värmebehovet och kostnaden för förbrukad värme uppskattas. Elförbrukningen beräknas utifrån uppskattat specifik elförbrukning ( $\text{kWh/m}^3$  substratblandning) och behandlad mängd substrat. Utifrån detta uppskattas kostnaden för elförbrukningen.
8. Redovisningen av resultat sker i ett separat Excel-dokument.

Beskrivning av funktioner och separata exekveringsfiler

**volfl** – spädvattenbehovet beräknas utifrån mängden torrsbstans och ansatt önskad torrsbstanshalt i substratblandningen. Den ökade behandlingsvolymen blir alltså summan av volymen spädvatten och ökad mängd mottaget substrat. Ökningen fördelas lika över drifttiden och adderas till ursprungliga flödet överallt där flödet är skilt från noll.

**Qvrm** – med temperaturdata, flödesdata och TS-halt som inparametrar beräknar denna funktion värmemängdsändringen för substratblandningen mellan två tillstånd.

**csbst** – beräknar specifik värmekapacitet för substratet utifrån torrsbstanshalt.

**hyggloss** – definierar ytemperatur på tanken, plockar ut temperatur- och flödesdata för substratet i tanken under hygieniseringen, under fyllningen och under tömningen av tanken. Beräknar ledningsförlusterna i tanken under hygieniseringen (*Qcond*). Beräknar värmeförluster i rör in till och ut från tanken (*Qvrm*). Beräkningarna genomförs separat för respektive tank.

**Qcond** – beräknar momentana ledningsförluster i tanken under hygieniseringen givet temperaturen i substratet under hygieniseringen, temperaturen på tanken yttre yta och termiska resistansen.

**termR** – utifrån dimensioner och materialtjocklek i tankens yttre hölje beräknas termiska resistansen fram för respektive konstruktionsdel. Det är här tankens dimensioner och prestanda anges.

**nextT** – används för att beräkna temperaturen i röret in till hygieniseringstanken alldeles innan mynningen ut i tanken. Kräver att temperaturdata finns för temperaturen efter VVX4 och temperaturdata från hygieniseringstanken finns tillgänglig.

**Qconds** – beräknar momentana ledningsförluster i tanken under hygieniseringen när temperaturdata från substratet i tanken under hygienisering och temperaturen på tankens yta inte finns tillgängliga. Istället utnyttjas en användarangiven hygieniseringstemperatur och temperaturen i omgivande processhallen tillsammans med framräknad termisk resistans och värmeövergångskoefficient för att beräkna värmeförlusterna.

**termRS** – här definieras dimensioner och prestanda på tankarna. Den termiska resistansen beräknas och inkluderar även värmeövergångskoefficienten. Utifrån momentan värmeförlust i grundscenariot, känd temperatur på hygieniseringstankens yta, temperaturen i omgivande processhall och mantelarea på tanken beräknas värmeövergångskoefficienten fram.

**Warmcost** – utifrån summan av uppvärmningsbehovet och varmhållningsbehovet i tanken under hygieniseringen beräknas värmekostnaderna fram genom multiplikation med fjärrvärmepriset.

**Elcost** – elförbrukning per behandlad mängd substrat beräknas fram i energikartläggningen. Specifika elförbrukningen för omrörare och pumpar i hygieniseringssteget multipliceras med mängden behandlat substrat och elpriset för att få fram kostnaden för elenergiförbrukningen i hygieniseringen.





SLU  
Institutionen för energi och teknik  
Box 7032  
750 07 UPPSALA  
Tel. 018-67 10 00  
pdf.fil: [www.slu.se/energioghteknik](http://www.slu.se/energioghteknik)

SLU  
Department of Energy and Technology  
P. O. Box 7032  
SE-750 07 UPPSALA  
SWEDEN  
Phone +46 18 671000